

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 **53**

**2025**

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

---

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

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА  
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

---

**ENVIRONMENTAL SAFETY AND  
NATURAL RESOURCES**

**Збірник наукових праць**

Випуск 1 (53), січень – березень 2025 р.

Заснований у 2008 р.  
Виходить 4 рази на рік

---

**Academic journal**

Issue 1 (53), January – March 2025

Founded in 2008  
The journal is published 4 times a year

**КИЇВ 2025**

---

**KYIV 2025**

**ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:**

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

**ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:**

**О.С. ВОЛОШКІНА**, д-р техн. наук, проф.

**Н. КАСАГЛІ**, професор, Італія

**Н. МАРГВЕЛАШВІЛІ**, PhD, Австралія

**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

**С.О. ДОВГИЙ**, д-р фіз.-мат. наук, проф.,  
академік НАНУ

**В.Б. ЄГОРОВ**, д-р техн. наук

**С.В. ЗАЙЦЕВ**, д-р техн. наук, проф.

**О.В. КОПІЙКА**, д-р техн. наук, проф.

**Г.М. КОЧЕТОВ**, д-р техн. наук, проф.

**Т.І. КРИВОМАЗ**, д-р техн. наук, проф.

**О.Є. КРУЖИЛКО**, д-р техн. наук

**О.Г. ЛЕБІДЬ**, д-р техн. наук

**М.Л. МИРОНЦОВ**, д-р техн. наук

**В.О. МІЛЕЙКОВСЬКИЙ**, д-р техн. наук, проф.

**Т.О. НЕГРІЙ**, канд. техн. наук

**О.В. НЕСТЕРЕНКО**, д-р техн. наук

**С.В. СУКАЧ**, д-р техн. наук, проф.

**О.М. ТЕРЕНТЬЄВ**, д-р техн. наук

**О.М. ТИХЕНКО**, д-р техн. наук, проф.

**Т.М. ТКАЧЕНКО**, д-р техн. наук, проф.

**В.М. ТРИСНЮК**, д-р техн. наук

**В.О. УСТИМЕНКО**, д-р фіз.-мат. наук, проф.

**В.Ф. ФРОЛОВ**, д-р техн. наук, проф.

**Д.І. ЧЕРНІЙ**, д-р техн. наук

**С.Й. ШАМАНСЬКИЙ**, д-р техн. наук

**Є.О. ЯКОВЛЄВ**, д-р техн. наук

**МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА**

**М.-Й. ВАЛЕРІ**, проф., Польща

**М. ЖЕЛЕЗНЯК**, д-р техн. наук, професор,

Фукусіма, Японія

**Д. МІНТЕР**, проф., Великобританія

**А. МШО**, дослідник, Франція

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

**Я. ПЕКУТІН**, проф., Польща

**ПІНГ ЛУ**, проф., Китай

---

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол № 3 від 13.03.2025)

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

**ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА**

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

---

**АДРЕСА РЕДАКЦІЇ**

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

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



Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

## ЗМІСТ

### ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

<b>Кривомаз Т.І., Гамоцький Р.О., Циба А.М.</b> Стратегії диверсифікації ризиків енергозабезпечення багатоповерхових житлових будівель в умовах війни.....	7
<b>Магась Н.І., Туз Р.В.</b> Гідрологічні особливості та характеристика водогосподарської діяльності у пониззі річки Синюха.....	22
<b>Шибанова А.М., Руда М.В., Джумеля Е.А., Панчук П.Г.</b> Оцінювання екологічного стану водних екосистем басейну Західного Бугу.....	35
<b>Ткаченко Т.М., Сахновська В.М.</b> Експрес-метод моніторингу екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення України під час військових дій.....	48
<b>Осокіна Н.П.</b> Екологічні проблеми Донбасу: сільськогосподарські забруднювачі та якість підземних вод Донецької області.....	62
<b>Приходько В.Ю., Сафранов Т.А.</b> Дослідження просторово-часових особливостей утворення твердих побутових відходів в регіонах України.....	69

### ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<b>Левченко О.Г., Полукаров Ю.О., Землянська О.В.</b> Гігієнічна характеристика способів дугового зварювання та зварювальних матеріалів.....	82
--	----

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

<b>Азімов О.Т., Триснюк В.М., Шевченко О.Л., Томченко О.В., Андрєєв А.А., Кіреєв С.І.</b> Оцінка сучасної складової підтоплення на території Чорнобильської зони відчуження методами дистанційних технологій.....	95
<b>Трофимчук О.М., Заболотний С.В., Кацалап В.О.</b> Удосконалення методу семіотичного аналізу матеріалів для виявлення інформаційно-психологічного впливу.....	111
<b>Терентьєв О.М., Дуда В.О.</b> Метод відновлення пропусків у даних на основі комбінованої моделі експоненційного згладжування.....	125

<b>Триснюк В.М., Єгоров В.О.</b> Математична модель розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження супутникових каналів зв'язку із використанням нейронних мереж.....	132
<b>Носков О.В., Миронцов М.І.</b> Застосування технології збільшення роздільної здатності мігрованих сейсмічних зображень для 2Д сейсмічних зйомок за допомогою нейронної мережі.....	139
<b>Волинець Т.В., Мосійчук Д.І.</b> Інформаційні системи спостереження морських акваторій та прилеглих зон з використанням аерокосмічних технологій.....	146
<b>Крисенко П.</b> Проблематика прогнозування коефіцієнта пропускання за допомогою нейронних мереж з обмеженою кількістю даних.....	155
<b>Шевчук О.В.</b> Інформаційні технології екологічного моніторингу сміттєзвалищ із застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів.....	164
<b>ДО ВІДОМА АВТОРІВ</b> .....	173

## CONTENTS

### ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

<b>Kryvomaz T., Hamotskyi R., Tsyba A.</b> Diversification strategies of energy supply risks for multi-story residential buildings in war conditions.....	7
<b>Magas N., Tuz R.</b> Hydrological features and characteristics of water management activities in the lower reaches of the Sinyukha river.....	22
<b>Shybanova A., Ruda M., Dzhumelia E., Panchuk P.</b> Assessment of the ecological condition of aquatic ecosystems of the West Bug basin.....	35
<b>Tkachenko T., Sakhnovska V.</b> Express monitoring of environmental safety in Ukrainian municipal wastewater systems during war.....	48
<b>Osokina N.</b> Environmental problems of Donbas: agricultural pollutants and the quality of groundwater in Donetsk region .....	62
<b>Prykhodko V., Safranov T.</b> Study of spatial and temporal features of municipal solid waste generation in the regions of Ukraine.....	69

### CIVIL SAFETY

<b>Levchenko O., Polukarov Yu., Zemlyanska O.</b> Hygienic characteristics of welding methods and welding materials.....	82
--	----

### INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

<b>Azimov O., Trysniuk V., Shevchenko O., Tomchenko O., Andreiev A., Kireev S.</b> Assessment of the current component of underflooding within the territory of the Chernobyl exclusion zone by the methods of remote sensing technologies.....	95
<b>Trofymchuk O., Zabolotnyi S., Katsalap V.</b> Improvement of the method of semiotic analysis of materials for detection of informational-psychological impact.....	111
<b>Terentiev O., Duda V.</b> Method for restoring missing data based on a combined exponential smoothing model.....	125
<b>Trysnyuk V., Ehorov V.</b> Mathematical model of the distribution of radio monitoring resources for observation of satellite communication channels using neural networks.....	132

<b>Noskov O., Myrontsov M.</b> Implementation of neural network based 2D seismic images super resolution approach.....	139
<b>Volynets T., Mosiichuk D.</b> Information systems for observation of marine aquatories and adjacent areas using aerospace technologies.....	146
<b>Krysenko P.</b> The problem of prediction of the transmission coefficient using neural networks with a limited quantity of data.....	155
<b>Shevchuk O.</b> Information technologies for environmental monitoring of landfills using remotely piloted aircraft .....	164
<b>INFORMATION FOR AUTHORS</b> .....	173

# ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDC 620.9:504

**Tetiana Kryvomaz**, Doctor of Technical Sciences, Candidate of Biological Sciences, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labor Protection  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7426-8745> *e-mail*: [ecol@i.ua](mailto:ecol@i.ua)

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

**Artem Tsyba**, PhD student  
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4532-0982> *e-mail*: [absqueee@gmail.com](mailto:absqueee@gmail.com)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## DIVERSIFICATION STRATEGIES OF ENERGY SUPPLY RISKS FOR MULTI-STORY RESIDENTIAL BUILDINGS IN WAR CONDITIONS

***Abstract.** Targeted large-scale attacks on Ukraine's energy infrastructure have led to massive outages and increased the risk of power supply. The total damage to facilities that provide electricity generation, transmission, and distribution is estimated at \$8 billion. High-rise residential urban buildings have become particularly vulnerable, where prolonged power outages can have catastrophic consequences. Powering high-rise residential buildings in wartime is achieved by combining various risk diversification strategies that take into account periodic power outages, the possibility of using alternative sources, and the installation of energy storage systems. The use of renewable energy sources for local generation ensures power supply during outages and reduces dependence on the centralized power system, but the specific technical requirements and operating parameters of heat pumps, wind turbines, and solar panels significantly limit their use in dense urban areas. Installing solar photovoltaic panels in multi-storey city buildings does not completely solve the problem of energy supply in winter, when their efficiency can drop to 10%, however, during summer power outages, solar energy can provide certain energy needs of residents of residential complexes. To stabilize the power system in extreme war conditions, it is advisable to locally apply maneuverable gas generation by implementing balancing technologies with a large range of regulation of various loads and use pickers for emergency situations. One of the key technical requirements for generating units is their ability to start/stop at least 4 times a day and reach maximum power within 15 minutes from the moment of switching on. Integration of centralized power supply, renewable energy sources, pickers and balancers is possible under the conditions of using energy storage systems that ensure stability and reliability of supply and allow for effective management of energy resources. The use of demand management technologies with intelligent*



control allows for optimal use of available energy, avoiding peak loads, reducing electricity costs, and increasing energy independence and reliability of energy supply for multi-apartment residential buildings. Decentralization is formed at the generation level with the strengthening of the balancing segment to ensure the agility of the Ukrainian power system, i.e. increasing the ability to produce as much electricity as consumers need at a given moment.

**Key words:** energy supply, high-rise buildings, diversification, renewable energy, batteries, flexible generation.

**Т.І. Кривомаз, Р.О. Гамоцький, А.М. Циба**

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

## **СТРАТЕГІЇ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ РИЗИКІВ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ В УМОВАХ ВІЙНИ**

**Анотація.** Цілеспрямовані масштабні атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури України призвели до масових відключень та збільшили ризики збоїв у постачанні електроенергії. Оцінка загальної суми збитків об'єктів, що забезпечують виробництво, передачу та розподіл електроенергії, наближається до \$8 млрд. Особливо вразливими стали житлові багатоповерхівки міст, де тривале відключення електроенергії має катастрофічні наслідки. Енергозабезпечення багатоповерхових житлових будівель в умовах війни досягається шляхом поєднання різних стратегій диверсифікації ризиків, що враховують періодичні відключення централізованого електропостачання, можливість використання альтернативних джерел та встановлення систем накопичення енергії. Використання відновлюваних джерел енергії для локальної генерації забезпечує енергопостачання під час відключень та знижує залежність від централізованої енергосистеми, проте специфічні технічні вимоги та параметри функціонування теплових насосів, вітряків та сонячних панелей значно обмежують їх використання в умовах щільної міської забудови. Встановлення сонячних фотоелектричних панелей у багатоповерхових міських будинках не вирішує повністю проблему енергозабезпечення взимку, коли їх ефективність може знижуватися до 10%, однак під час літніх знеструмлень сонячна енергія може забезпечити певні енергетичні потреби мешканців житлових комплексів. Для стабілізації енергосистеми в екстремальних умовах війни доцільно локально застосовувати маневрену газову генерацію шляхом впровадження технологій балансування з великим діапазоном регулювання різних навантажень і використовувати пікери для аварійних ситуацій. Однією з ключових технічних вимог до генеруючих одиниць є їхня здатність щонайменше 4 рази протягом доби забезпечувати пуск/зупинку та виходити на максимальну потужність за 15 хвилин від моменту включення. Інтеграція централізованого електропостачання, відновлюваних джерел енергії, пікерів та балансерів можлива за умов використання систем накопичення енергії, що забезпечують стабільність і надійність постачання та дозволяють ефективно управляти енергоресурсами. Застосування технологій керування поптом з інтелектуальним управлінням дозволяє оптимально використовувати доступну енергію, уникати пікових навантажень, зменшувати витрати на електроенергію, а також підвищувати енергонезалежність та надійність енергопостачання багатоквартирних житлових будівель. Децентралізація формується на рівні генерації з посиленням балансувального сегменту для

*забезпечення маневреності української енергосистеми, тобто підвищення спроможності виробляти стільки електрики, скільки потрібно споживачам в певний момент.*

**Ключові слова:** енергопостачання, багатоповерхові будинки, диверсифікація, відновлювана енергетика, акумулятори, маневрена генерація.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.7-21>

## Вступ

Масовані атаки на енергетичну інфраструктуру України призвели до руйнування об'єктів виробництва та розподілу електроенергії, спричинили масові відключення та суттєво збільшили ризики збоїв у енергопостачанні. Попередня оцінка загальної суми збитків енергетичного сектору наближається до \$8 млрд, і ця сума зростає з кожним днем війни [6]. Особливо вразливими стали житлові багатоповерхівки, де тривалі відключення позбавляють мирних жителів електроенергії, опалення, водопостачання та інших життєво необхідних комунальних послуг.

В умовах постійних загроз ударів агресора по енергетичній системі України необхідно децентралізувати генерацію, щоб мережа продовжувала працювати навіть при пошкодженні магістральних ліній і систем централізованого електропостачання. Для забезпечення надійності та стійкості енергопостачання багатоповерхових житлових будинків можна використати кілька стратегій диверсифікації, що враховують різноманіття енергопостачання, генерацію на місці, зберігання енергії та керування попитом.

Локальне виробництво енергії з можливістю зберігання в акумуляторах дозволяє оптимально використовувати власні ресурси та мінімізувати залежність від зовнішніх постачальників. Використання відновлюваних джерел підвищує енергетичну незалежність та екологічність, однак потребує значних початкових витрат на встановлення, спеціалізоване технічне обслуговування і до того ж обмежене щільністю міської забудови. Впровадження систем накопичення для збереження надлишкової енергії та її використання під час пікових навантажень знижує потреби в постійному зовнішньому енергопостачанні та забезпечує резерв на випадок аварійних ситуацій. Проте існують певні обмеження щодо тривалості зберігання енергії та деградації батарей з часом. Система накопичення енергії з інтелектуальним управлінням дозволяє уникнути пікових навантажень і оптимально використовувати доступну енергію, що особливо важливо для житлових комплексів з високим попитом. Використання технологій керування попитом знижує енергоспоживання в пікові години, зменшує витрати на електроенергію, оптимізує використання енергії, підтримує екологічну стабільність.

Оптимальне енергозабезпечення для багатоповерхового житлового будинку досягається за допомогою різних стратегій та їх поєднання, що враховують особливості інфраструктури, кліматичні умови та потреби мешканців. Крім підвищення стійкості до руйнівних атак, децентралізована генерація сприятиме зростанню частки чистих джерел енергії в енергетичному балансі країни, що сприятиме залученню міжнародного фінансування в узгодженні з євроінтеграційними планами розвитку України.

## Постановка завдання

Метою цього дослідження є пошук рішень для диверсифікації ризиків енергопостачання житлових міських багатоповерхівок в умовах війни. У відповідності із поставленою метою сформульовано наступні завдання:

- проаналізувати структуру енергогенерації України;
- дослідити можливості децентралізованої генерації житлових масивів;
- розглянути специфіку маневреної газової генерації;
- порівняти переваги і недоліки відновлюваних джерел енергії для багатоквартирних міських будинків;
- з'ясувати роль систем накопичення енергії для інтеграції різних способів енергопостачання;
- розробити схему модуля диверсифікованої системи енергопостачання та управління попитом багатоповерхових житлових будинків.

## Результати досліджень

Об'єднана енергетична система України будувалася як централізована структура з великими вузловими електростанціями та системою передачі електричної енергії з лініями високих класів напруг. За даними НЕК «Укренерго», до початку повномасштабного вторгнення Україна мала наступну структуру енергогенерації: атомні електростанції (АЕС) забезпечували близько 50-55% усієї електроенергії, теплові електростанції (ТЕС) – 30-35%, гідроелектростанції (ГЕС) – 6-8%, відновлювані джерела енергії (ВДЕ) – 10-12% (рис. 1) [7]. В умовах війни така конфігурація виявилась вразливою до цілеспрямованих ворожих атак на енергосистему, оскільки практично неможливо забезпечити захист великих електростанцій.

На різних етапах було розроблено низку сценаріїв розвитку об'єднаної енергетичної системи України. Зокрема передбачалось, що електроенергія з відновлюваних джерел стане базовою та буде домінувати за обсягами вже з середини 2030-х років, а до 2050 року досягне 83%, тобто потужності сонячних електростанцій становитимуть 44 ГВт, а вітрових – 35 ГВт. При цьому на маневрені газові станції та установки зберігання енергії відводилось по 18 ГВт встановленої потужності [4].

В умовах війни централізована система енергопостачання виявилась вразливою, тому при перманентних загрозах найбільш раціональним рішенням стала децентралізована генерація енергії. Замість однієї електростанції в 1000 МВт пропонується побудувати багато станцій потужністю від 5 до 20-30 МВт, які підключаються до розподільних мереж. За оцінками НЕК «Укренерго», для відновлення генеруючих потужностей та забезпечення громадян стабільним енергопостачанням необхідно щонайменше 15 ГВт нових генеруючих потужностей. При цьому 11,6 ГВт з цього обсягу можуть бути побудовані з використанням підходу децентралізованої генерації. Це передбачає 3,3 ГВт маневреної генерації, 4,5 ГВт вітрової генерації та 3,8 ГВт сонячної генерації із залученням 12,8 млрд євро інвестицій (рис. 1) [6].

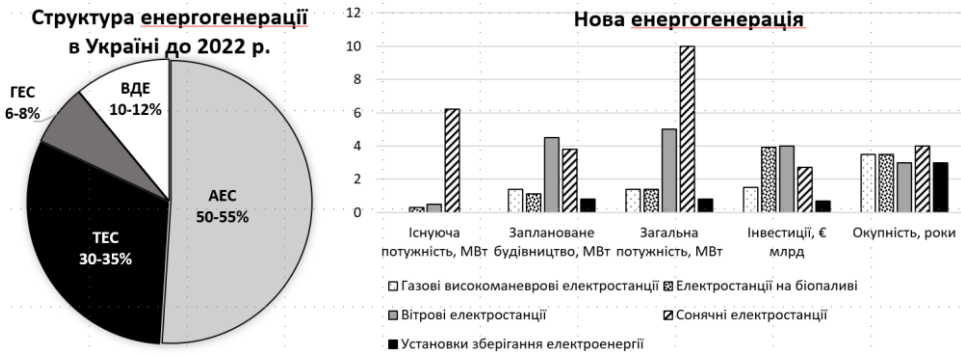


Рис. 1. Структура енергогенерації в Україні за даними НЕК «Укренерго»

Децентралізована генерація передбачає виробництво енергії безпосередньо поблизу споживачів на невеликих об'єктах, що дозволяє зменшити втрати при транспортуванні та підвищити надійність енергопостачання. Ворогу значно складніше одночасно знищити численні розосереджені невеликі електростанції та установки зберігання енергії, що дає змогу мінімізувати втрати потужності в об'єднаній енергетичній системі України. Таким чином децентралізація формується саме на рівні генерації з посиленням балансувального сегменту для забезпечення маневреності української енергосистеми, тобто збільшення спроможності виробляти стільки електрики, скільки потрібно споживачам в кожен момент.

Для порівняння економічної конкурентоспроможності та раціональної оцінки собівартості енергії з різних джерел використовують показник «врівноваженої вартості електроенергії» (Levelised Cost of Energy – LCOE). Це міра середньої чистої поточної вартості виробництва електроенергії для генеруючої станції протягом усього терміну служби. LCOE включає витрати на будівництво, експлуатацію, технічне обслуговування та постачання, а також витрати на фінансування. Аналіз врівноваженої вартості джерел електроенергії в США за 2023 р. продемонстрував діапазон вартості в доларах/МВт-год для різних джерел електроенергії, а також мінімальну та максимальну вартість для кожного джерела. Найдешевшими джерелами електроенергії в США у 2023 р. виявились наземні вітрові та сонячні фотоелектричні установки. Шкала корисності з діапазоном вартості 24-75 доларів США/МВт-год і 24-96 доларів США/МВт-год відповідно. Наступним за ціною виявився газовий комбінований цикл із діапазоном від \$39 до \$101/МВт-год [15]. Це найдешевше джерело серед викопного палива з урахуванням розвитку сучасних методів видобутку. Деякі джерела електроенергії мають широкий діапазон вартості, а інші – вузький. Це вказує на мінливість і невизначеність певних факторів, які впливають на LCOE, таких як капітальні витрати, витрати на паливо, експлуатаційні витрати, коефіцієнти потужності та ставки дисконту (рис. 2).

Базуючись на показниках LCOE та враховуючи не тільки нагальні потреби, але й довгострокові плани розвитку енергосистеми України, система розподіленої генерації включає такі елементи: 1) електроустановки з гарантованою потужністю на природному газі; 2) об'єкти відновлюваної енергетики; 3) установки зберігання енергії; 4) мережі керування попитом.

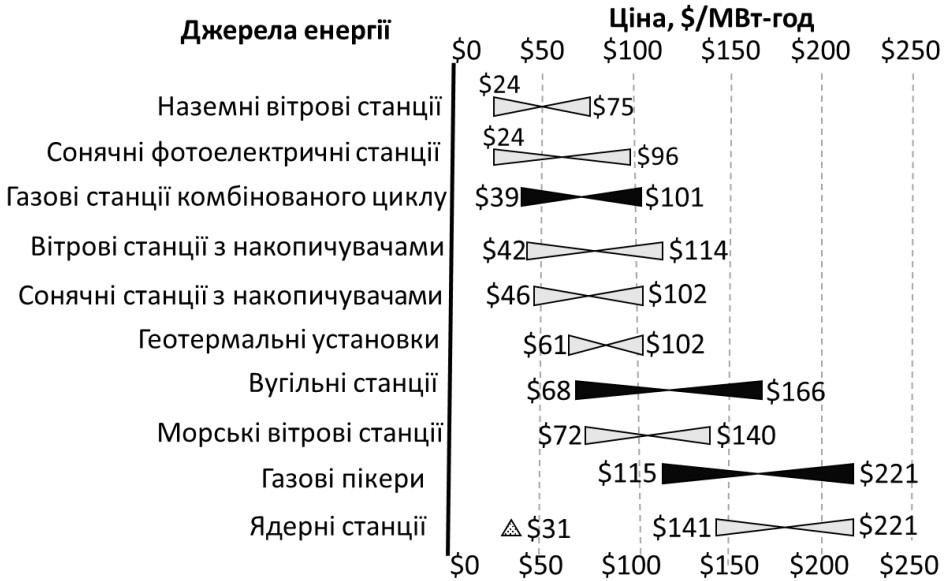


Рис. 2. Діапазон вартості для різних джерел електроенергії в США за 2003 рік

**Маневрена газова генерація.** Згідно з аналітичними оцінками спеціалістів українського енергетичного сектору, газова маневрена установка повинна відповідати таким характеристикам:

- 1) керуваність – гарантовано забезпечувати певну потужність протягом визначеного часу з можливістю повного контролю оператором установки;
- 2) гнучкість – широкий діапазон регулювання потужності (близько 60% встановленої потужності) та швидкість виходу на номінальну потужність протягом 15 хвилин з «холодного» старту;
- 3) оперативність – мати короткий строк будівництва та введення в експлуатацію (до одного року);
- 4) незалежність – працювати на паливі вітчизняного видобутку (природний газ) з урахуванням цін на газ та електричну енергію;
- 5) високий коефіцієнт корисної дії (ККД) – до 40% для класичних газотурбінних установок простого відкритого циклу, 60% для установок комбінованого циклу з котлом-утилізатором та паровою турбіною, 90% у разі застосування когенерації [7].

Для аварійних і непрогнозованих ситуацій використовують пікери – сучасні маневрені та потужні енергосистеми з високим ККД. Пікери більшу частину часу знаходяться у резерві, тому їх паливна ефективність досі не мала великого значення, а більше уваги приділялось капітальним витратам. Однак дослідження показали, що використання пікерів з відносно невисоким паливним ККД та значною вартістю кожного пуску для балансування енергосистеми є неефективним, тому коефіцієнт використання встановленої потужності пікерів та їх паливна ефективність тепер мають більше значення [11].

Для стабілізації енергосистеми України необхідно розвивати технології балансування. Балансери повинні вмикатися/вимикатися багаторазово

протягом доби, працюючи 20-25% часу на різних навантаженнях з великим діапазоном регулювання. Такі установки, як правило, використовують для балансування відновлюваних джерел. У цьому випадку важливі і капітальні, і експлуатаційні витрати, тобто не тільки ціна обладнання й будівництва, але й вартість отриманої енергії [12]. У пікерів і балансерів різні ролі, але для обох підходів до стабілізації енергопостачання найчастіше застосовують маневрену газову генерацію. Для газової генерації найбільш широко використовують газопоршневі, газотурбінні та парогазові установки [9].

Великі парогазові установки (ПГУ) зазвичай виконують роль станцій базового навантаження, оскільки вони краще функціонують в режимі постійних навантажень з обмеженим діапазоном регулювання потужності і не призначені для циклічної роботи. Водночас парогазові станції значно маневреніші за вугільні, тому їх можуть використовувати для балансування, однак через технологічні особливості часте вмикання/вимикання призводить до швидкого зносу обладнання. У ПГУ висока паливна ефективність (до 60%), однак вона суттєво знижується при роботі на частковому навантаженні, до того ж їх будівництво коштує близько 1200 євро за кВт встановленої потужності. Загалом ця технологія є досить ефективною, але водночас досить дорогою і не дуже маневреною [2].

Газотурбінні станції (станції прямого циклу) можуть стояти у резерві, за потреби запускатися за 15-20 хвилин і вимикатися без шкоди для обладнання, коли потреба в них зникає. Газотурбінні установки відносно дешеві в капітальних витратах – 1 кВт газотурбінної станції обійдеться у 600-700 євро, але їх ККД зазвичай близько 40%, а на часткових навантаженнях він падає до 30% [1]. Особливістю газотурбінних технологій є обмеження циклічності роботи, що має вираження у вартості кожного пуску станції. Тобто використання газотурбінної станції з відносно невисоким паливним ККД та значною вартістю кожного пуску у якості пікера для балансування енергосистеми є неефективним.

Газопоршневі установки схожі з газотурбінними за своїми технічними характеристиками, але у модульному варіанті діапазон регулювання становить до 90% номінальної потужності, час виходу на номінальну потужність з «холодного» старту займає до 5 хвилин, а ККД досягає 50%. У газопоршневих станцій капітальні витрати такі самі, як у газотурбінних станцій (600-700 євро на 1 кВт), а ККД в них близько 50% [4]. Тобто електроенергія буде як мінімум на чверть дешевшою, ніж та, яку виробляє газотурбінна станція. Таке співвідношення капітальних та експлуатаційних витрат є суттєвою перевагою. Отже, при застосуванні як для балансування відновлюваних джерел енергії, так і для «підхоплення» піків, газопоршневі станції є універсальною технологією і найдешевшим рішенням [5].

Когенераційні електроустановки призначені для комбінованого виробництва електричної та теплової енергії. Вони керовані, економічні, стали у довгостроковій перспективі, швидко будуються та вводяться в експлуатацію, тому гарантовано можуть корегувати графік навантаження електричної та теплової енергії за вимогою. За оцінками НЕК «Укренерго», для проєкту такої установки потужністю 5МВт необхідні інвестиції 5-6 млн євро, період окупності складе 1-2 роки. Вкладені кошти інвестор зможе повернути через 3-4 роки завдяки продажу електроенергії на ринку та надаючи послуги із забезпечення резерву [7]. Мережа високоманеврових генеруючих потужностей

зі швидким стартом критично необхідна енергосистемі для забезпечення наявності гарантованих резервів заміщення та швидкодіючих резервів вторинного регулювання.

**Оцінка потенціалу відновлюваної енергетики.** Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) до повномасштабного вторгнення склали понад 10% в енергобалансі України і за прогнозами приріст цих потужностей становитиме більше половини від загального обсягу до 2040 року [12]. Для масштабного розміщення вітроелектростанцій підходять території Херсонської, Миколаївської, Запорізької, Донецької та Луганської областей, які потребують розмінування і відбудови після припинення бойових дій. Згідно з технічними вимогами території з вітровими станціями вимагають обмеженого доступу, що забезпечить час для тривалого процесу розмінування і сприятиме природному відновленню території.

В містах розміщувати вітрові станції немає сенсу та технічних можливостей, тому міські проекти відновлюваної енергетики реалізуються шляхом встановлення сонячних панелей на дахах і фасадах багатоквартирних будинків. Зокрема КМДА в умовах нестачі електроенергії щорічно виділяє на сонячні станції по 200 млн грн, а для приватних домогосподарств програми «Енергодім» та «ГрінДІМ» від Фонду енергоефективності пропонують суттєві пом'якшення умов кредитування [8]. У Спільноті споживачів комунальних послуг України підтримують встановлення сонячних станцій у приватних будинках, але вважають недоцільним використання бюджетних коштів на розміщення сонячних панелей на дахах і фасадах міських багатоповерхівок. Найбільший дефіцит енергії виникає взимку при відключеннях внаслідок обстрілів, але саме тоді ККД потужності сонячних станцій може знижуватись шестикратно. Натомість пропонують забезпечити багатоповерхові будинки зарядними станціями та генераторами, а також подбати про термоізоляцію та облік тепла [6].

Перевагами сонячних електростанцій є економічність, екологічність, короткий строк будівництва та введення в експлуатацію. Водночас вони мають негарантований графік виробництва електричної енергії, який залежить від рівня сонячної інсоляції, що характеризується добовою та річною періодичністю. При цьому середньодобові обсяги виробництва електричної енергії у зимовий період значно нижчі за аналогічні показники у період літнього максимуму сонячної інсоляції. Зростання потужностей сонячних електростанцій без впровадження систем управління попитом та установок зберігання енергії призводить до формування профіцитів електричної енергії у денні години весняно-літнього періоду [18]. У зв'язку з цим будівництво нових сонячних електростанцій має здійснюватися одночасно з будівництвом установок зберігання енергії та маневрової генерації для формування оптимальної структури генеруючих потужностей, що дозволить вирівняти попит на електричну енергію.

Однією з причин обмеженого використання ВДЕ є дискретність енергетичних потоків, тобто періодичність надходження енергії та змінність енергетичного потенціалу. В певні періоди вони можуть виробляти надлишок енергії, що призводить до перевантаження системи, а в інші періоди енергії надходить менше, ніж потрібно споживачам. Для подолання проблеми періодичності постачання енергії з відновлюваних джерел застосовують системи накопичення енергії.

**Системи накопичення енергії** (Energy Storage System, ESS) – це комплекс пристроїв і технологій, призначених для акумулювання, зберігання та подальшого використання електроенергії. Енергія може накопичуватися і зберігатися у тепловій, механічній, хімічній, електрохімічній, електричній, магнітній і гібридній формі [17]. При виборі накопичувачів електричної енергії враховують низку енергетичних та експлуатаційних показників: питома потужність, питома енергія, питома вартість накопичувача енергії, термін заряду-розряду, термін служби, ККД, рівень саморозряду, безпека, простота обслуговування, вид виробленої та споживаної енергії [13]. Кожна система має специфічний перелік переваг і обмежень, тому вибір здійснюється в залежності від потреб і можливостей.

Згідно з дослідженням в Україні найбільш широко використовуються п'ять типів акумуляторних батарей: свинцево-кислотні (VRLA – Valve Regulated Lead-Acid), літій-залізо-фосфатні (LiFePO<sub>4</sub>), літій-іонні (Li-ion), акумулятори з абсорбуючою сіткою зі скловолокна (AGM – Absorbed Glass Material) та гелеві (GEL) батареї. Свинцево-кислотним акумуляторам VRLA надають перевагу 35% споживачів, оскільки вони добре себе зарекомендували в умовах частих відключень електрики для резервного живлення. Літій-залізо-фосфатні акумулятори вибирає 26% користувачів, оскільки вони вважаються найбільш довговічними батареями з 10 000 циклами перезаряду та збереженням ємності до 85% від номінальної. Приблизно однакова кількість українців обирає літій-іонні (15%) та AGM (14%) акумулятори, що підходять для вискоелективних систем з мінімальною вагою і довгим терміном служби. Гелевими акумуляторами користується 10% з опитаних споживачів. Ці батареї допускають досить глибокий розряд, повною мірою відновлюються після зарядки, не витікають навіть при пошкодженні корпусу, а термін служби складає 7-12 років (рис. 3).

Генеруюче обладнання на основі відновлюваних джерел акумулює енергію в режимі постійного підзаряду і забезпечує стабільне живлення, вирівнюючи добові коливання, що виникають у процесі експлуатації. При роботі з промисловою електромережею системи акумулювання електричної енергії накопичують позапікову електроенергію в нічний час і забезпечують електроживлення у періоди відключень. Комбіновані системи зберігання енергії (hybrid energy storage systems, HESS) відрізняються ефективним сполученням кількох технологій зберігання енергії з взаємодоповнюючими експлуатаційними характеристиками: щільність енергії та потужності, швидкість саморозряду, ефективність, термін експлуатації тощо [9].

Сумісність з системами генерації також грає одну з ключових ролей для побудови надійної системи безперебійного живлення. Можливість конвертування сонячної енергії або енергії дизельних або бензинових генераторів дозволять не залежати від наявності електроенергії в централізованих мережах 220 вольт. Слід також враховувати і пікові навантаження, які виникають при запуску енергоємного обладнання.

Найбільш поширені серед побутових споживачів системи енергетичної незалежності будуються на базі гібридного інвертора, який перетворює накопичену в акумуляторних модулях енергію в звичний змінний струм, який використовується для живлення побутових приладів. Також інвертори перетворюють енергію від сонячних панелей або інших систем генерації для заряду акумуляторів або віддачі надлишку в мережу.



Модульна архітектура окремих блоків з інверторів і акумуляторів дозволяє будувати трифазні мережі і значно нарощувати потужність шляхом паралельного підключення однакових пристроїв [11]. Системи накопичення енергії забезпечують стабільність і надійність постачання та дозволяють ефективно управляти енергоресурсами.

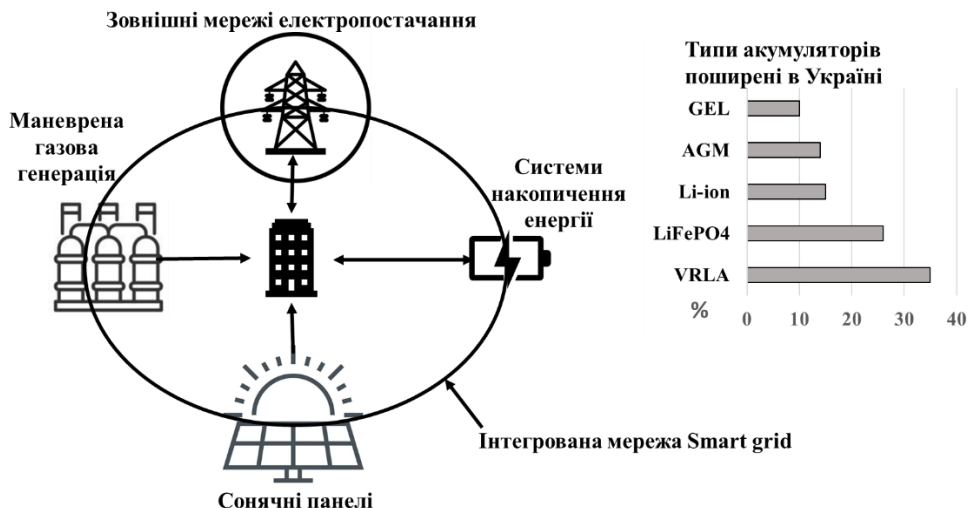


Рис. 3. Диверсифікаційний модуль енергозабезпечення багатоповерхових будівель

**Керування попитом** виходить на якісно новий рівень завдяки розвитку саморегулюючих, поновлюваних та повністю інтегрованих розумних електроенергетичних систем Smart grid. Такі електричні мережі включають різноманітні оперативні та енергоощадні заходи, зокрема розумні лічильники, поновлювані джерела енергії та ресурси забезпечення енергоефективності. Розумна мережа (Smart grid) має мережеву топологію на основі генеруючих джерел, магістральних та розподільних мереж [19]. Всі типи споживачів електричної енергії координуються в єдиній мережі інформаційно-керуючих пристроїв, де баланс попиту і пропозицій відстежується в режимі реального часу. Інтелектуальні адаптивні системи захисту, прогнозування, підтримки та прийняття рішень можуть мати вбудовану функцію автоматичного відновлення живлення. Віртуальні електростанції з акумуляторним живленням об'єднують в єдиній системі домашні акумулятори та розумні лічильники різних споживачів. Системи накопичення енергії можливо об'єднати в загальний агрегатор домашніх акумуляторів для балансування енергосистеми. Акумулятори накопичують електроенергію, яка за потреби продається споживачами на балансуєчому ринку [16].

Згідно із сценарієм нової політики (New Policies Scenario) Міжнародного енергетичного агентства, світовий попит на електроенергію зростає більше, ніж на 20% протягом наступного десятиліття. Водночас попит на гнучкість, тобто здатність енергосистеми швидко адаптуватися до змін в енергопостачанні й енергосистемі, збільшиться приблизно на 80% [14]. Тому гнучкість лежить в основі розвитку майбутніх систем електроенергетики. Актуальна технічна потреба вимагає розвитку технології балансування, що вмикається

багаторазово протягом доби, працює на різних навантаженнях з великим діапазоном регулювання. Використання технологій керування попитом знижує енергоспоживання в пікові години, зменшує витрати на електроенергію, оптимізує використання енергії, підтримує екологічну стабільність.

## Дискусія

Енергетичний сектор та комунальна сфера трансформуються, щоб відповідати викликам енергетичної безпеки в умовах війни. Для цього система з розподіленою генерацією має відповідати ряду технічних, економічних та організаційних вимог. На технічному рівні має бути гарантовано електропостачання об'єктів критичної інфраструктури та якомога більшої кількості споживачів у разі виникнення системної аварії в об'єднаній енергетичній системі України із знеструмленням підстанцій системи передачі та вузлових електростанцій. Економічні вимоги забезпечують прийнятну конкурентну ціну електричної енергії для споживачів та раціональне використання коштів міжнародної фінансової допомоги. Організаційна складова передбачає інтеграцію діючої моделі конкурентного ринку та законодавства України щодо ринку електричної енергії у відповідність з вимогами законодавства Європейського Союзу [1].

За прогнозами Bloomberg до 2030 року очікується тринадцятикратне зростання темпів розвитку балансуєчих технологій на газу та приросту потужностей систем накопичення енергії [10]. Потреба в додаткових маневрених потужностях існувала вже давно і питання розвитку високоманеврової генерації в Україні розглядалося ще у 2020 році, але тоді відповідні проекти не отримали підтримки через високу вартість. Будівництво генеруючих потужностей не розглядалося компаніями, бо навіть за ставками зовнішнього фінансування термін окупності становив близько 12 років [4]. Без вилучення капітальних витрат з ціни на енергію навіть найпередовіша інвестиція не буде конкурентоздатною, хоч би вона й була дуже необхідною для енергосистеми. Інвесторам було не вигідно заходити на український ринок з адміністративними регулюючими механізмами без державної підтримки на будівництво чи бонусів за когенерацію [6]. Тепер за рахунок міжнародної підтримки відкриваються унікальні можливості для будівництва балансуєчих потужностей.

В Європейському Союзі розроблено певні механізми підтримки потужностей, які мають забезпечити балансову надійність енергосистеми та сприяти вирішенню проблем безпеки постачання. Розбудовується система, включно з платформами для транскордонного обміну балансуєчими послугами, яка має на меті забезпечити оптимізацію ринку балансуєвальних ресурсів по всій Європі. Для інтеграції України до європейського енергетичного простору ще 28 червня 2017 року між НЕК «Укренерго» та ENTSO-E підписана Угода про можливість синхронізації енергосистеми України з ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). У 2021 році систему управління інформаційною безпекою Укренерго було сертифіковано за міжнародним стандартом ISO/IEC 27001:2013. Впроваджена інтегрована система управління НЕК «Укренерго» відповідає вимогам міжнародних стандартів ISO 9001:2015, ISO 14001:2015,

ISO 45001:2018. Ще у грудні 2021 року НКРЕКП сертифікував НЕК «Укренерго» як оператора системи передачі європейського зразка. Але тільки 24 лютого 2022 року після повномасштабного вторгнення росії «Укренерго» виконало запланований перехід енергосистеми України на ізольований режим роботи – енергосистема була відключена від російської, білоруської і навіть від європейських енергосистем. Вже 28 лютого 2022 року Рада Європейського Союзу підтримала екстрену синхронізацію енергосистем України та Молдови до електромережі континентальної Європи ENTSO-E. А 16 березня 2022 року, в умовах війни, енергосистема України екстрено перейшла на пробну синхронну роботу з європейським енергооб'єднанням країн континентальної Європи ENTSO-E [3].

Хронологія кроків у напрямку інтеграції енергосистеми України до європейської свідчить про те, що шлях відмови від енергоносіїв ворога був довгим і складним, але переломний момент вже залишився позаду. Тепер настав важливий етап формування стійкої децентралізованої мережі енергопостачання з впровадженням сучасних технологій генерації, накопичення, розподілу та балансування енергії. Кошти міжнародної фінансової допомоги на підтримку енергосектора України в першу чергу слід використовувати для термінового ремонту зруйнованої і пошкодженої інфраструктури. Водночас необхідно враховувати потреби формування базису для стійкої енергетики нового рівня. Завдяки міжнародній фінансовій допомозі відкриваються можливості для створення унікальної диверсифікованої енергоструктури, яка навіть може стати прикладом для інших країн.

Для забезпечення фінансової прозорості та ефективності процесу енергореконструкції необхідна тісна співпраця підприємств енергетичного сектору та професійних галузевих асоціацій. Грунтовний аналіз сучасних технологій у галузі енергетики потребує залучення широкого кола науковців і практиків. А міжнародна законодавча база та вітчизняні законотворчі ініціативи у галузі енергетики вимагають ретельного опрацювання для розробки механізмів їх практичного впровадження у реальне життя з урахуванням потреб громадян України.

## **Висновки**

Енергозабезпечення багатоповерхових житлових будівель в умовах війни досягається шляхом поєднання різних стратегій диверсифікації ризиків, що враховують періодичні відключення централізованого електропостачання, можливість використання альтернативних джерел та встановлення систем накопичення енергії.

Використання відновлюваних джерел енергії для локальної генерації забезпечує енергопостачання під час відключень та знижує залежність від централізованої енергосистеми, проте специфічні технічні вимоги та параметри функціонування теплових насосів, вітряків та сонячних панелей значно обмежують їх використання в умовах щільної міської забудови.

Встановлення сонячних фотоелектричних панелей у багатоповерхових міських будинках не вирішує повністю проблему енергозабезпечення взимку, коли їх ефективність може знижуватися до 10%, однак під час літніх знеструмлень сонячна енергія може забезпечити певні енергетичні потреби мешканців житлових комплексів.

Для стабілізації енергосистеми в екстремальних умовах війни доцільно локально застосовувати маневрену газову генерацію шляхом впровадження технологій балансування з великим діапазоном регулювання різних навантажень і використовувати пікери для аварійних ситуацій.

Інтеграція централізованого електропостачання, відновлюваних джерел енергії, пікерів та балансерів можливе тільки за умов використання систем накопичення енергії, що забезпечують стабільність і надійність постачання та дозволяють ефективно управляти енергоресурсами.

Застосування технологій керування попитом з інтелектуальним управлінням дозволяє оптимально використовувати доступну енергію, уникати пікових навантажень, зменшувати витрати на електроенергію, а також підвищувати енергонезалежність та надійність енергопостачання багатоквартирних житлових будівель.

Децентралізація формується на рівні генерації з посиленням балансувального сегменту для забезпечення маневреності української енергосистеми, тобто підвищення спроможності виробляти стільки електрики, скільки потрібно споживачам в певний момент.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вікно Відновлення України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [recovery.win](https://recovery.win). – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
2. Децентралізована генерація як можливість зміцнення та оновлення української енергосистеми [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rehouse.org.ua/counsellor/detsentralizovana-heneratsiya-yak-mozhlyvist-zmitsnennya-ta-onovlennya-ukrayinskoji>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
3. Законодавство України. Офіційний вебпортал парламенту України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
4. Звіт секретаріату енергетичного співтовариства Україна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://energy-community.org/news/Energy-Community-News/2020/12/02.html>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
5. Про енергетичну ефективність будівель [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://ips.ligazakon.net/document/T172118?an=1&ed=2020\\_12\\_01](https://ips.ligazakon.net/document/T172118?an=1&ed=2020_12_01). – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
6. Українська енергетика [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua-energy.org/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
7. Укренерго НЕК ПрАТ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.energy/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
8. Фонд енергоефективності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eefund.org.ua/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
9. Ali A.O., Elmarghany M.R., Abdelsalam M.M., Sabry M.N., Hamed A.M. Closed-loop home energy management system with renewable energy sources in a smart grid: A comprehensive review. – *Journal of Energy Storage*. – №50. – 2022. – P.104609.
10. BloombergNEF [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://about.bnef.com/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
11. Cook N., Taylor E.J. Assembling imperceptibility: The material, financial and policy dimensions of combustible cladding in residential high-rise. – *Housing, Theory and Society*. – №40(1). – 2023. – P.113-129.
12. Gas to Power Journal [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gastopowerjournal.com/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.

13. Hussein I., Ilinca A., Perron J. Energy storage systems – Characteristics and comparisons. – Renewable and sustainable energy reviews. – №12.5. – 2008. – P.1221-1250.
14. International Energy Analysis (IEA) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/commentaries/battery-storage-is-almost-ready-to-play-the-flexibility-game>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
15. International Renewable Energy Agency (IRENA) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.irena.org/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
16. Kadrić D., Aganovic A., Martinović S., Delalić N., Delalić-Gurda B. Cost-related analysis of implementing energy-efficient retrofit measures in the residential building sector of a middle-income country – A case study of Bosnia and Herzegovina. – Energy and Buildings. – №257. – 2022. – P.111765.
17. Mitali J., Dhinakaran S., Mohamad A.A. Energy storage systems: A review. – Energy Storage and Saving. – №1.3. – 2022. – P.166-216.
18. Olabi A.G. Renewable energy and energy storage systems. – Energy. – №136. – 2017. – P.1-6.
19. Stopps H., Thorneycroft C., Touchie M. F., Zimmermann N., Hamilton I., Kesik T. High-rise residential building makeovers: Improving renovation quality in the United Kingdom and Canada through systemic analysis. Energy Research & Social Science. – №77. – 2021. – P.102085.
20. Zhou Y. Climate change adaptation with energy resilience in energy districts – A state-of-the-art review. – Energy and Buildings. – №279. – 2023. – P.112649.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2024 і прийнята до друку після рецензування 04.02.2025

## REFERENCES

- [1] Ukraine Recovery Window. (2024, December 12). <https://recovery.win>. (in Ukrainian).
- [2] Decentralized generation as an opportunity to strengthen and renew the Ukrainian energy system. (2024, December 12). <https://rehouse.org.ua/counsellor/detsentralizovana-heneratsiya-yak-mozhlyvist-zmitsnennya-ta-onovlennya-ukrayinskoyi>. (in Ukrainian).
- [3] Legislation of Ukraine. Official web portal of the Parliament of Ukraine. (2024, December 12). <https://zakon.rada.gov.ua/laws>. (in Ukrainian).
- [4] Report of the Energy Community Secretariat Ukraine. (2024, December 12). <https://energy-community.org/news/Energy-Community-News/2020/12/02.html>. (in Ukrainian).
- [5] About energy efficiency of buildings. (2024, December 12). [https://ips.ligazakon.net/document/T172118?an=1&ed=2020\\_12\\_01](https://ips.ligazakon.net/document/T172118?an=1&ed=2020_12_01). (in Ukrainian).
- [6] Ukrainian energy. (2024, December 12). <https://ua-energy.org/>. (in Ukrainian).
- [7] Ukrengo. (2024, December 12). <https://ua.energy/>. (in Ukrainian).
- [8] Energy Efficiency Fund. (2024, December 12). <https://eefund.org.ua/>. (in Ukrainian).
- [9] Ali, A.O., Elmarghany, M.R., Abdelsalam, M.M., Sabry, M.N., Hamed, A.M. (2022). Closed-loop home energy management system with renewable energy sources in a smart grid: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 50, 104609.
- [10] BloombergNEF. (2024, December 12). <https://about.bnef.com/>.
- [11] Cook, N., Taylor, E.J. (2023). Assembling imperceptibility: The material, financial and policy dimensions of combustible cladding in residential high-rise. *Housing, Theory and Society*, 40(1), 113-129.
- [12] Gas to Power Journal (2024, December 12). <https://gastopowerjournal.com/>.
- [13] Hussein, I., Ilinca, A., Perron, J. (2008). Energy storage systems – Characteristics and comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12.5, 1221-1250.
- [14] International Energy Analysis (IEA). (2024, December 12). <https://www.iea.org/commentaries/battery-storage-is-almost-ready-to-play-the-flexibility-game>.

- [15] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024, December 12). <https://www.irena.org/>.
- [16] Kadrić, D., Aganovic, A., Martinović, S., Delalić, N., Delalić-Gurda, B. (2022). Cost-related analysis of implementing energy-efficient retrofit measures in the residential building sector of a middle-income country – A case study of Bosnia and Herzegovina. *Energy and Buildings*, 257, 111765.
- [17] Mitali, J., Dhinakaran, S., Mohamad, A.A. (2022). Energy storage systems: A review. *Energy Storage and Saving*, 1.3, 166-216.
- [18] Olabi, A.G. (2017). Renewable energy and energy storage systems. *Energy*, 136, 1-6.
- [19] Stopps, H., Thorneycroft, C., Touchie, M. F., Zimmermann, N., Hamilton, I., Kesik, T. (2021). High-rise residential building makeovers: Improving renovation quality in the United Kingdom and Canada through systemic analysis. *Energy Research & Social Science*, 77, 102085.
- [20] Zhou, Y. (2023). Climate change adaptation with energy resilience in energy districts – A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 279, 112649.

*The article was received 11.11.2024 and was accepted after revision 04.02.2025*

**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 Повітряних сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7426-8745> **e-mail:** [ecol@i.ua](mailto:ecol@i.ua)

**Гамоцький Роман Олегович**

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

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

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

**Циба Артем Миколайович**

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

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

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

УДК 556.162:628.17

**Nataliia Magas**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Ecology and Environmental Technologies

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

**Ruslan Tuz**<sup>2</sup>, Head of the Department of Water Cadastre and Technogenic and Environmental Safety

**e-mail:** mk\_vodres@davr.gov.ua

<sup>1</sup>Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

<sup>2</sup>Regional Office of Water Resources in Mykolaiv region, Mykolaiv, Ukraine

## **HYDROLOGICAL FEATURES AND CHARACTERISTICS OF WATER MANAGEMENT ACTIVITIES IN THE LOWER REACHES OF THE SINYUKHA RIVER**

**Abstract.** *The issue of conservation and protection of water resources has always been relevant in Ukraine. The situation is particularly catastrophic in the lower Pobuzhzhia, where the main source of water supply is the Southern Bug River and its tributaries. The most powerful tributary of the Southern Bug, which significantly affects the flow of the main river in the lower reaches, is the Sinyukha River. However, like most rivers in the steppe zone, the Sinyukha River is constantly affected not only by anthropogenic activities but also by climate change. A characteristic feature of the river is its significant use in various fields: domestic and industrial water supply, irrigation, and recreation. The geological and landscape features of the basin ensure a significant year-round water content and a stable seasonal hydrochemical state. The river's water content is formed under the influence of a complex of physical and geographical factors and depends on climatic and hydrogeographical processes. In the context of climate instability in recent years, against the background of rising ambient temperatures and a powerful agrogenic transformation of the catchment, there has been a significant, more than twofold decrease in water flow, which has caused a number of negative reactions of the river hydrosystem and related natural objects. Currently, the water content is in a prolonged low-water phase, which began in 2007 and has been going on for 17 years. The current low-water phase observed in the lower reaches of the river is more stable and deeper than the previous ones, which may be related to climate change. Against the backdrop of powerful natural and climatic factors, anthropogenic impact on the river and its hydrological regime is of secondary importance, which is a rare phenomenon for steppe rivers. The current level of river runoff use does not violate the ecological status of the Sinyukha River. To date, the Sinyukha River has retained its ecosystem functions, serving as a landscape and biotopic reserve for local biota. In addition, the river is an important source of drinking water supply for the population and a key means of replenishing and regulating groundwater conditions. The results of the study can be used in the development of flood control and water protection measures, as well as water management strategies in the lower Pobuzhzhia.*

**Key words:** *river hydroecology, natural and climatic factors, hydrological regime of the river, flood hazard, impact of water management activities.*

Н.І. Магась<sup>1</sup>, Р.В. Туз<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

<sup>2</sup>Регіональний офіс водних ресурсів у Миколаївській області, м. Миколаїв, Україна

## ГІДРОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОГОСПОДАРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ У ПОНИЗЗІ РІЧКИ СИНЮХА

***Анотація.** Питання збереження та охорони водних ресурсів завжди є актуальним на території України. Особливо катастрофічна ситуація склалась у нижньому Побужжі, де основним джерелом водопостачання є річка Південний Буг та її притоки. Найпотужнішою притокою Південного Бугу, яка суттєво впливає на стік головної річки у пониззі, є річка Синюха. Однак, як і більшість річок степової зони, р. Синюха потерпає від постійного впливу не тільки антропогенної діяльності, а й кліматичних змін. Характерною особливістю річки є її значне використання в різних сферах: у господарсько-питному та промисловому водопостачанні, зрошенні, рекреації. Геологічні та ландшафтні особливості басейну забезпечують значну цілорічну водонаповненість і стабільний сезонний гідрохімічний стан. Водність річки формується під впливом комплексу фізико-географічних факторів і залежить від кліматичних та гідргеографічних процесів. В умовах кліматичної нестабільності останніх років, на фоні підвищення температури середовища і потужної агрогенної трансформації водозбору, відбулось значне, більш ніж двократне зменшення витрат води, що спричинило низку негативних реакцій річкової гідросистеми та пов'язаних із нею природних об'єктів. На теперішній час водність знаходиться в тривалій маловодній фазі, яка розпочалась з 2007 року та триває вже 17-й рік. Сучасна маловодна фаза, яка спостерігається у пониззі річки, є більш стійкою та глибшою за попередні, що може бути пов'язано зі змінами клімату. На фоні дії потужних природно-кліматичних факторів антропогенний вплив на стан річки та її гідрологічний режим має другорядне значення, що є рідкісним явищем для степових річок. Сучасний рівень використання річкового стоку не порушує екологічний стан річки Синюха. До наявного часу річка Синюха зберігає свої екосистемні функції – слугує ландшафтним і біотопічним резерватом для місцевої біоти. Крім того, річка виступає важливим джерелом питного водопостачання для населення і ключовим засобом поповнення та регуляції стану підземних вод. Результати дослідження можуть бути використані при розробці протипаводкових та водоохоронних заходів, стратегії управління водними ресурсами у нижньому Побужжі.*

***Ключові слова:** гідроекологія річок, природно-кліматичні фактори, гідрологічний режим річки, паводкова небезпека, вплив водогосподарської діяльності.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.22-34>

**Постановка проблеми.** Проблема збереження річок та підтримання їх екосистемних функцій є важливою складовою сучасної гідроекології [1]. Особливої уваги потребує дослідження стану річок, що використовуються для питного водопостачання, а якість води у яких повинна відповідати санітарним нормам [2]. Такі напрямки дослідження викликані загальним і питним вододефіцитом, який відчувається не тільки в густонаселених країнах світу, а й в Україні [3]. З огляду на зміну клімату, скорочення водних ресурсів та



зростаючі потреби населення, постає необхідність перегляду підходів до охорони водних екосистем. Одним з напрямків організації збереження водних об'єктів є розробка стратегії сталого управління водними ресурсами, із забезпеченням балансу між використанням води для потреб людини та підтриманням природних процесів у річкових системах. Особливо гострою ця проблема є для південних регіонів України, зокрема Миколаївської області, де основним джерелом водопостачання є річка Південний Буг та її притоки. Рівень водозабезпечення на території області у перерахунку на одного мешканця становить 0,45 тис. м<sup>3</sup>/рік, що значно менше межі дефіциту водних ресурсів за класифікацією ООН. Відповідно, для збереження водних ресурсів в області актуальним є комплексний підхід, який включає детальне вивчення та аналіз впливу як природних, так і антропогенних чинників формування стабільного та сприятливого гідроекологічного стану водних об'єктів.

Вивченням гідроекологічної ситуації та антропогенного впливу на річку Південний Буг, яка є основним джерелом водопостачання на території Миколаївської області, займались багато науковців [4, 5, 6, 7]. Основна увага дослідників була зосереджена саме на Південному Бузі, тоді як вивчення його притоків й досі не має вираженої системності. Періодичні результати оцінки екологічного стану основних приток Південного Бугу висвітлено у роботах [8, 9, 10]. При цьому, сучасний гідроекологічний стан та водогосподарська діяльність в басейні річки Синюхи, яка є одною з найбільших приток степового пониззя р. Південний Буг, вивчені украй недостатньо. До основних причин явно недостатнього рівня сучасної вивченості цієї водойми можна віднести віддаленість річки Синюхи від крупних міст та відсутність у її басейні великих площ зрошувального землеробства.

**Метою даної роботи** є аналіз гідрологічних особливостей у пониззі річки Синюхи та оцінка впливу водогосподарської діяльності на сучасний гідроекологічний стан річки.

При проведенні даного дослідження було використано значний обсяг літературних, картографічних, звітних ретроспективних і новітніх даних гідрологічних спостережень, а також фактичні дані власних польових обстежень у 2021-2024 рр. нижньої ділянки долини річки Синюхи – на відрізку течії від межі з Кіровоградською областю до злиття з Південним Бугом. Обробку даних було виконано на основі можливостей стандартного пакету програм «Statistika» (2020) операційної системи Excel 2020.

Визначення тривалості періодів і сезонів внутрішньорічного розподілу стоку води виконували на основі встановлення лімітуючого (ЛП) та нелімітуючого (НП) періодів року. У свою чергу, лімітуючий період поділявся на два сезони: лімітуючий (ЛС) і нелімітуючий (НС). За лімітуючі періоди та сезони приймалися місяці, які мали найменші річні витрати води за багаторічний період [16].

**Результати дослідження.** Згідно з кваліфікаційними положеннями Водного Кодексу (Ст. 79 ВКУ) [11], річка Синюха при довжині 111 км і розмірах власного басейну (9520 км<sup>2</sup>) належить до середніх річок. Вона є самим крупним лівим притоком Південного Бугу, привносячи йому від 41 до 63% сумарного стоку [5]. Поєднання у межах міста Первомайська річок Синюхи, Кодими і бузького русла формує нижню ділянку течії Південного Бугу, яка разом із навколишніми місцевостями в географічно-історичному плані відома як Нижнє Побужжя [12].

Басейн річки Синюха розташований на межі Байрачного (Північного) Степу і Лісостепу. Висоти водозбору помірні (165-105 м). Особливості рельєфу, пов'язані з геоструктурною та літологічною будовою південно-західного схилу Українського Кристалічного щита та його позитивною неотектонікою [13], слугують визначальними умовами функціонування водозбору Синюхи. Розташування басейну річки практично на осі Воейкова спричиняє значну чутливість належного їй гідрометеорологічного комплексу до циклічних кліматичних коливань [14].

Сумісний вплив природних і антропогенних чинників в басейні Синюхи за останні 100 років зумовив досить значні зміни ландшафту. Це суттєво позначилось на рівнях водозбірного потенціалу місцевості.

Досліджувана упродовж останніх 3 років нижня ділянка річки Синюхи знаходиться в межах Миколаївської області. Середній похил від цього місця до гирла в Первомайську – 0,4‰, середній виважений похил від найдальшої точки (витік Гірського Тікичу) до гирла – 0,53‰, коефіцієнт звивистості річки – 1,27. Загальна площа водозбору Синюхи (без її приток) – 9520 км<sup>2</sup>, його середня висота складає 190,2 м, середня довжина – 124 км, середня ширина – 134 км, коефіцієнт ширини – 1,07. Загальна довжина водороздільної лінії – 742 км, коефіцієнт розвитку – 1,62. Водозбір тільки річки Синюхи складає 58,8% від сумарної площі її басейну (16 200 км<sup>2</sup>). Останній займає 25,4% басейнної території Південного Бугу, привносячи йому більше половини загального стоку.

Територія загального басейну охоплює майже всю західну і південну частини Придніпровської височини, тож середня висота цього водозбору сягає 200 м (середня висота водозбору власне Синюхи – 103 м), довжина від найбільш віддаленої точки до гирла – 171 км, висота найбільш віддаленого витоку – 260 м і відповідно середньо-зважений похил – 0,8‰. Розташований у західно-схильовій частині Південно-Придніпровської височини великий річковий басейн закономірно асиметричний, витягнутий з північного заходу на південний схід.

Кліматичні умови в басейні Синюхи досить відмінні від умов Степової зони і мають більш виражені ознаки помірно-континентального клімату з достатнім рівнем опадів на межі 500 мм/рік. Для нижньої ділянки басейну, частково розташованої у межах Степу, виражене тяжіння до Південно-Степового кліматичного комплексу при зимово-від'ємному кліматичному балансі та жаркому літі. Помітний дефіцит зволоження, виражений для цієї місцевості, зумовлений не стільки нестачею опадів (496 мм), як високим рівнем випаровування (800 мм і більше). З останнім пов'язана украй незначна величина місцевого стоку, який практично не враховується при гідрологічних розрахунках водності Синюхи, існуючої за рахунок притоку води з верхніх ділянок збірної басейну [15].

Температурний режим місцевостей басейну Синюхи за останні 50 років проявляє тенденцію до зростання, особливо за рахунок зимового періоду. Відчутними стали критично-спекотливі літні періоди в супроводі тривалого бездощів'я [15].

Рівні води річки Синюха в пониззі за останні роки не проявляють трендових змін (рис. 1, а), проте з 2018 року демонструють повільне зменшення. В середньорічних показниках усередненого рівня води за роками простежуються коливання в межах  $\pm 20$  см (від 107 до 123 см) та повільний спад у 2018-2023 рр. на -14 см, вказуючи на тенденцію зменшення водності.

Середні багаторічні максимальні та мінімальні рівні води упродовж 2013-2023 рр. демонструють більш виражені коливання, які чітко відображають специфіку кожного окремого року. Перевищення максимальних рівнів від середніх усереднено складає близько  $\pm 0,8$  м, а їх амплітуда  $\pm 0,82$  м, що перевищує амплітуду середніх багаторічних рівнів (0,2 м). Водночас, трендова лінія показників середніх максимальних рівнів води також вказує на їх повільне зменшення з 2018 року. Багаторічні мінімальні рівні води відрізняються від середніх на 0,34-0,61 м із знаком мінус, проте більш вирівняні по роках і виражено утримуються на межі 0,7 м, що свідчить про звичайність останніх на фоні більш різких перепадів максимальних рівнів. Тобто, роки малої та середньої водності в 2013-2023 рр. та сумарний період відносно низького рівня для річки Синюхи є більш звичайними, ніж багатоводні роки з високими рівнями води.

Середній багаторічний сезонний розподіл рівнів води Синюхи в пониззі річки в 2013-2023 рр. (рис. 1, б) також не проявляє відмінностей трендового рівня і загалом тяжіє до їх певного вирівнювання за рахунок нівеляції показників весняної повені.

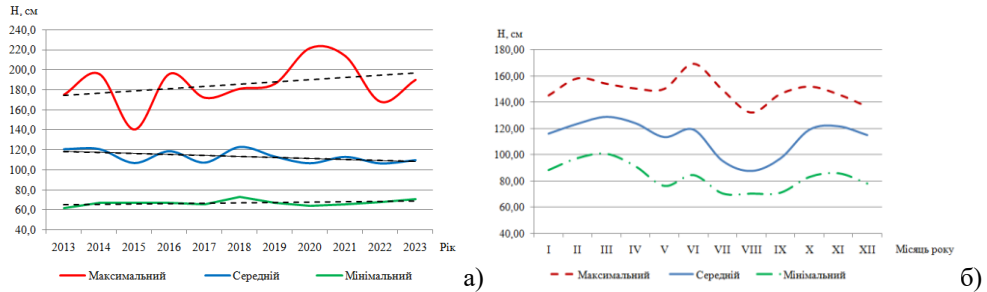


Рис. 1. Динаміка середніх багаторічних рівнів води річки Синюха за даними гідрологічного поста Синюхин Брід: а) середньорічна; б) сезонна

Виразеність межені лишається значною, сягаючи в середньому мінус 0,32 м проти середніх рівнів періоду весняної повені. Через зменшення, а іноді й відсутність потужних літньо-дошових паводків зимові рівні води майже зрівнялись із літніми рівнями (усередненими) і навіть перевищують їх. Безперечно, що на сезонні рівні води саме в пониззі суттєвий вплив спричиняє зарегульованість стоку річки греблями декількох руслових водосховищ, проте сучасна сезонна динаміка рівнів води (рис. 2) помітно відрізняється від ситуації другої половини минулого сторіччя.

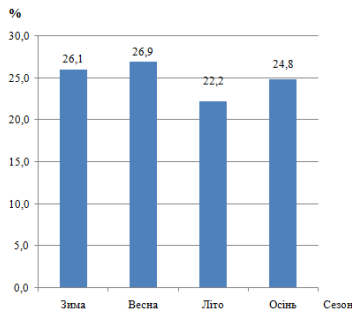


Рис. 2. Сезонна структура розподілу середніх багаторічних рівнів води річки Синюха за даними гідрологічного поста Синюхин Брід

Так, до кінця 80-х років минулого сторіччя вона мала більш виражену сезонну динаміку з типовим весняно-паводковим максимумом, літньо-осінньою меженню і наступним пізньоосінньо-зимовим зростанням. Сезонна структура рівнів на гідропосту Синюхин Брід складала 50% весняного, 40% літніх та 10% зимових частин, останні з яких на 0,25-0,3 м при відлигах перевищують літні [19]. Основною причиною сучасної трансформації сезонної структури водності стало різке зменшення рівнів весняного періоду та зростання зимових рівнів. Інтенсивність наростання весняних рівнів води в березні в другій половині ХХ сторіччя іноді сягала до 2,1 м/добу, тоді як в останні роки зазвичай не перевищує 0,36 м/добу. Водночас, зберігає значення і явище загального зростання рівня води в сторону пониззя, сягаючи там іноді до 3,5 м/добу. Найбільші розливи в межах нижньої ділянки річки з 1950 року фіксовані в 1956, 1969, 1985, 1997, 2004 та 2012 роках, супроводжуючись максимальними рівнями води на 2,3-2,4 м більше середніх багаторічних. Показники весняного рівня води на гідропосту Синюхин Брід у 1971-1985 рр. складала 3,67-4,1 м при загальному зростанні на 3,2-3,5 м проти меженних. Максимум зростання в +11,4 м був фіксований навесні 1932 року [17]. Середні весняні рівні води у період 2021-2024 складала 0,34 м проти меженних. Стабілізація та спад весняної повені відбувалась і відбувається досить повільно, переважно завершуючись до 20 чисел квітня, проте підвищений рівень води утримується до кінця першої декади травня. З кінця травня-початку червня починався повільний розвиток межени, який продовжувався до 20 чисел липня, сягаючи піку в 10-20 числах серпня. Меженний пік тривав до середини вересня, іноді затримуючись до жовтня. У жовтні 1946 та жовтні-грудні 1956 років після довготривалих посух проточність Синюхи вище гирла Чорного Ташлику припинялась, тоді як на гідропосту Синюхин Брід вода в руслі утримувалась лише завдяки стоковому підпору Південного Бугу [17].

Таким чином, по мірі розвитку кліматичних коливань останнього десятиріччя та зростання середньорічних температур, сезонна динаміка рівнів води в пониззі Синюхи втрачає типовий характер – рівні весняної повені стали відчутно нижчими при деякому зростанні літнього рівня, тож пік межени змістився на початок-середину вересня. Відчутно зросли зимові рівні, спричинені частими відлигами та дощами.

Дощові паводки традиційно були досить потужними завдяки притоковим водам із річок Ятрань, Тікич та Велика Вись, басейни яких розташовані в місцевостях з опадами на рівні 580-635 мм/рік. Згідно з ретроспективними даними, у другій половині ХХ сторіччя дощові паводки мали місце майже кожного літа і супроводжувались тимчасовим зростанням рівнів води на 1,2-1,5 м [17]. Щороку в пониззі фіксували до 5 хвиль дощових паводків, із яких 1-2 були досить значними в червні-липні. Дощові паводки катастрофічного рівня влітку для Синюхи рідкісні, останній із них відбувся на початку серпня 1979 року, дещо менш потужним був літній паводок 2004 року. Починаючи з 90-х років минулого сторіччя, частоти прояву та потужність дощових паводків у пониззі Синюхи різко зменшились і за останні роки мають досить стертий характер. У 2021-2024 рр. проходження суттєвих дощових паводків мало місце лише в червні-липні 2021 року, супроводжуючись зростанням рівня води на +0,8 м і пришвидшенням течії до 0,4 м/с. Зимові паводки, спричинені дощами і таненням снігу при відлигах (можливо і супутнім зростанням частки підземного живлення), для Синюхи є звичайним

явищем, розвиваючись переважно в січні-лютому. Проте, їх вираженість в останні роки значно стерта через відсутність тривалого льодоставу, який частково стримує інтенсивність підвищення стоку і демонструє візуальні прояви зимових розливів. Взимку 2019-2020 років льодостав і сніговий покрив у басейні Синюхи були відсутні.

Льодовий режим річки був і лишається у край нестабільним. До кінця ХХ сторіччя він лишався прямо залежним від стоково-течієвих режимів водотоку, тоді як в останні десятиріччя проявляє чітку кореляцію із зимовими температурами у градаціях нижче мінус 10°C. Суцільний льодовий покрив у пониззі Синюхи в зимові сезони 2019-2020, 2020-2021 та 2023-2024 років був практично відсутнім.

Сезонний розподіл водності та динаміку витрати води в пониззі Синюхи було проаналізовано на основі порівняння даних низки звітних і ретроспективних матеріалів щодо гідрологічного режиму річки Синюхи та більш новітніх даних в створі гідропоста села Синюхин Брід.

Для виявлення закономірностей змін водності річки Синюха, був проведений аналіз багаторічних коливань характеристик середньорічного стоку води, а також у період весняної повені та літньо-осінньої межені. Простежена динаміка відхилень показників витрат води річки Синюха від нормального рівня графічно відображена даними рисунку 3, які свідчать про наявність акцентованої тенденції до зменшення стоку впродовж останніх років. Аналіз циклічності коливань стоку води за одержаними різницевиими інтегральними кривими свідчить, що на теперішній час водність знаходиться в тривалій маловодній фазі, яка розпочалася з 2007 року та триває вже 17-й рік. Сучасна маловодна фаза є більш стійкою та глибшою за попередні, що може бути пов'язано зі змінами клімату.

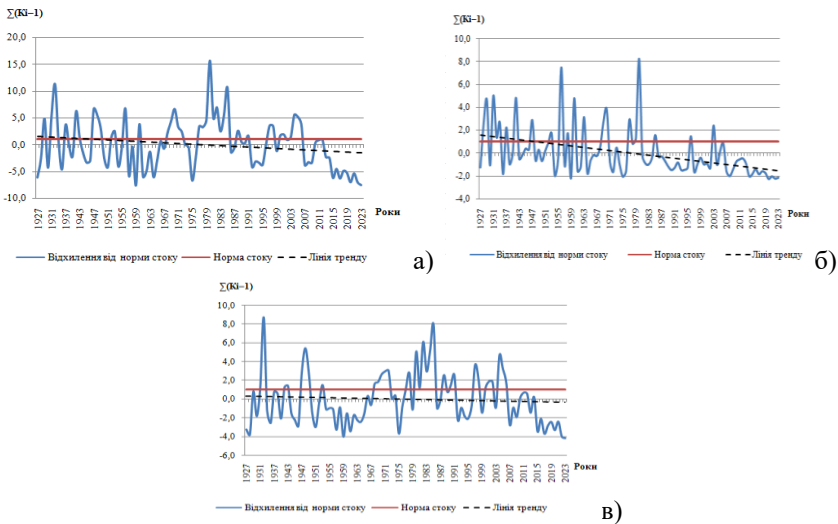


Рис. 3. Багаторічні коливання середньорічних витрат води у річці Синюха за даними гідрологічного поста Синюхин Брід: а) за середньорічними показниками; б) у період весняної повені; в) у період літньо-осінньої межені

Головними їх причинами стало зменшення весняного стоку за рахунок обмеження снігового живлення та часткова елімінація потенціалу поверхневого стоку в умовах майже суцільної оранки водозбірних площ.

Певну роль має і підвищення випаровуваності через зростання температур і посилення сонячної радіації [18], сумарний вплив яких нівелював навіть позитивний вплив деякого зростання опадів (+76 мм у пониззі Синюхи).

Закономірних змін набув і сезонний характер витрат води. За різницево-інтегральною кривою середньорічного стоку води, багатоводна фаза (нелімітуючий період водогосподарського року) для річки Синюха припадає на лютий-квітень, що відображено в схемах поділу водогосподарського року на періоди та сезони (рис. 4). Останні демонструють збереження пікових витрат води під час весняного стоку та різкого спаду межених витрат (лімітуючий період), негативний пік яких припадає на серпень-початок вересня (лімітуючий сезон).

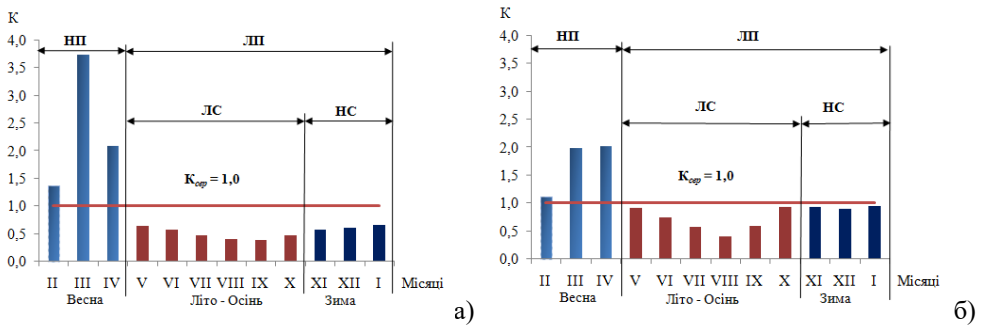


Рис. 4. Сезонна структура розподілу середніх багаторічних витрат води річки Синюха в створі гідропосту Синюхин Брід: а) в період з 1927 по 1979 роки; б) в період з 1980 по 2023 роки

Простежуючи сезонний розподіл стоку за досліджуваній період, виявлені його виражені коливання, які прямо пов'язані з метеокліматичною ситуацією в басейні гідромережі, поєднаної річкою Синюхою. Так, фактичні дані кінця XIX – першої половини XX сторіччя саме для нижньої ділянки річки також свідчать про значну амплітуду коливань стоку, зумовлену стрімким міжсезонним перебігом температур і опадів [18, 19]. Близькі до них показники за розмахом амплітуди сезонних витрат води знову набули повторного прояву в 2010-2024 роках на фоні аналогічного загострення міжсезонних температур і опадів. Наслідком дії цих чинників стали зміни сезонного стоку, в структурі якого поступово зменшується частка весняно-паводкового періоду – із 63% в 30-60-ті роки до 58% в 70-х роках і до 51% в 1991-2023 роках та 43% в останнє десятиріччя. Водночас, вирівнюються частки літньо-дощового живлення і зимового живлення, які нині майже однакові. Практично припинились інтенсивні літньо-дощові паводки [17, 19], вирівнялись зимові рівні та витрати води.

Таким чином, сучасний гідрологічний стан р. Синюха є закономірним проявом довготривалої реакції складної багатоконпонентної гідросистеми річки на дію негативних природно-кліматичних факторів. Їх потужний вплив для річкового пониззя й досі пом'якшується достатнім обсягом притокових вод із лісостепових місцевостей Придніпровської Височини. При цьому простежується різниця сезонної структури стоку для верхніх притоків і пониззя Синюхи, що вказує на значимість впливу висотно-стокових умов басейну. Так, у порівняно більш зволжених ділянках верхів'я, але з більшим похилом русла (більше 5‰) має місце більш інтенсивний стік, ніж у рівнинній ділянці пониззя (менше 5‰).

Негативний характер антропогенного впливу на водність Синюхи явно теж має місце і складається з відбору поверхневих вод, зарегульованості стоку гідротехнічними спорудами та збільшенням площі водного дзеркала з відповідними втратами на випаровуваність.

За даними державної статистичної звітності (2-тп водгосп), щорічно в нижній ділянці басейну річки Синюха забирається близько 2,5-3,0 млн м<sup>3</sup> води. Основна частка забору води здійснюється з поверхневих джерел (95–97%). Однак, обмежений дебіт свердловин (0,1-1,1 л/сек) та порівняно висока мінералізація (0,9-1,6-2,3 тис. мг/л) підземних вод суттєво обмежують потенціал водозабезпечення за рахунок їх видобутку, спричиняючи необхідність посиленого використання річкової води.

Аналізуючи водогосподарську діяльність у пониззі р. Синюха, можна зробити висновки про суттєве, більше ніж у 2,4 раза, зменшення об'ємів забору поверхневої води (рис. 5). Загальні втрати при транспортуванні забраної води становлять близько 21%.

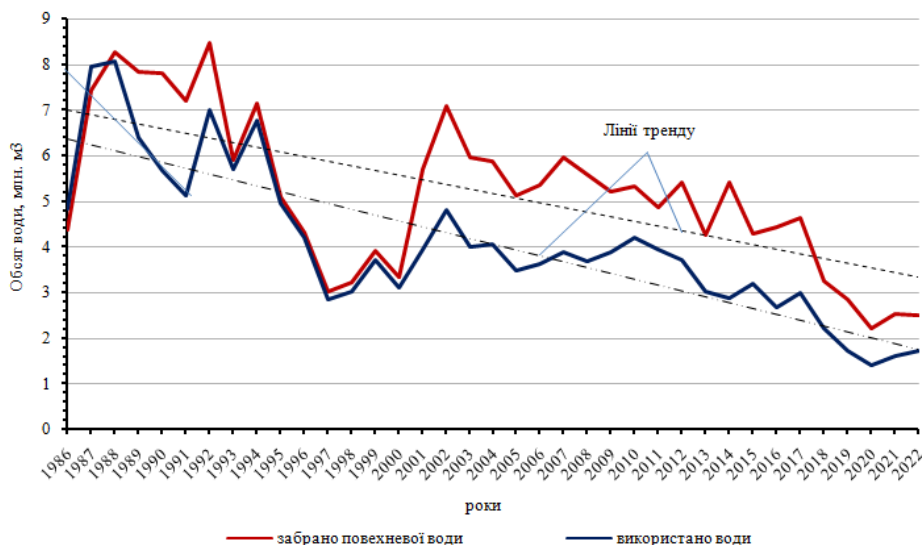


Рис. 5. Динаміка забору і використання забраної поверхневої води у пониззі річки Синюха

Більше 60% забраної поверхневої води з р. Синюха було використано на питні та санітарно-гігієнічні потреби, більше 22% – зрошення, 19% – виробничі потреби (рис. 6). Основні показники використання води річки Синюха у її пониззі свідчать, що структура водоспоживання в басейні практично не змінилась, але за останні 10 років спостерігається зменшення, майже на 60%, водозабору на питні та санітарно-гігієнічні потреби. Основним первинним водокористувачем на цій ділянці річки є Комунальне підприємство Первомайської міської ради «Первомайське управління водопровідно-каналізаційного господарства». Середні обсяги відбору води з річки Синюхи на питному водозаборі міста Первомайська в 2021-2023 дещо менші, ніж в минулі роки [20], і оцінені в 2,5 млн м<sup>3</sup>/рік, що складає трохи більше 1% від її загального стоку у маловодні роки.

Різке збільшення загальних об'ємів забраної поверхневої води спостерігається з появою зрошення сільсько-господарських земель в басейні р. Синюхи. Зменшення водозабору майже на 33% у період з 1995 по 2000 роки пов'язано зі зменшенням загальної кількості водокористувачів (у 2,3 раза) та об'ємів водопостачання на виробничі потреби, зокрема найбільш водоспоживаючої галузі – машинобудування.

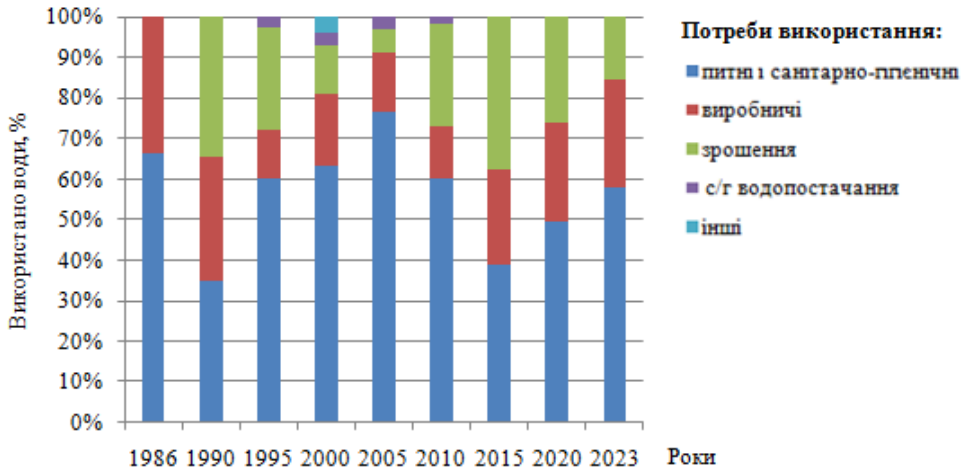


Рис. 6. Структура споживання забраної поверхневої води на різні потреби населення

Результати аналізу даних свідчать, що рівень впливу забору води на гідросистему річки явно поступається потужностям природно-кліматичних деструкцій, хоча й безперечно посилює їх потенціал.

Рівень антропогенного навантаження на басейн річки краще всього характеризують показники скидів стічних вод. У пониззі річки Синюха скид промислових та господарсько-побутових нормативно очищених на очисних спорудах зворотних вод здійснює Комунальне підприємство Первомайської міської ради «Первомайське управління водопровідно-каналізаційного господарства». Загальний обсяг скиду зворотних вод у пониззі р. Синюха в період з 1986 по 2012 роки майже не змінювався і складав 0,4-0,5 млн м<sup>3</sup>/рік. З 2012 року об'єм скиду зворотних вод збільшився у 2,5 раза. Протягом останніх п'яти років спостерігається поступове зменшення скидів до попередніх показників, що свідчить про зниження антропогенного навантаження у пониззі р. Синюха.

Отже, водогосподарська діяльність у пониззі Синюхи не порушує її екологічний стан, а сучасний рівень використання річкового стоку можна оцінити як «добрий».

**Висновки.** Узагальнюючи результати трирічних досліджень та їх аналіз, закономірно сформулювати наступні висновки:

1. В умовах кліматичної нестабільності останніх років, на фоні підвищення температури середовища і потужної агрогенної трансформації водозбору, відбулось значне, більш ніж двократне зменшення витрат води ( $Q_{\text{сеп}}$ ), що спричинило низку негативних реакцій річкової гідросистеми та пов'язаних із нею природних об'єктів.



2. На теперішній час водність знаходиться в тривалій маловодній фазі, яка розпочалася з 2007 року та триває вже 17-й рік. Сучасна маловодна фаза є більш стійкою та глибшою за попередні, що може бути пов'язано зі змінами клімату.

3. За останні десятиліття в басейні річки Синюха не спостерігалось виникнення небезпечних гідрологічних явищ, що свідчить про низький рівень паводкової небезпеки.

4. До наявного часу річка Синюха зберігає свої екосистемні функції – слугує ландшафтним і біотопічним резерватом для місцевої біоти, виступає важливим джерелом питного водопостачання для населення і ключовим засобом поповнення та регуляції стану підземних вод;

5. На фоні дії потужних природно-кліматичних факторів антропогенний вплив на стан річки та її гідрологічний режим має другорядне значення, що є рідкісним явищем для степових річок.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Результати дослідження можуть бути використані при розробці протипаводкових та водоохоронних заходів, стратегії управління водними ресурсами у нижньому Побужжі. Перспективи подальших досліджень логічно пов'язані з деталізацією привнесення забруднюючих речовин, якими виступають притоки річки Синюхи, а також дослідженнями її гідрохімічних параметрів, необхідних для повноцінного аналізу потенціалу водогосподарчих перспектив даної гідросистеми.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. World water assessment programme. UN World Water Development Report 2022. URL: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2022/>
2. National systems to support drinking-water, sanitation and hygiene: global status report 2019. UN-water global analysis and assessment of sanitation and drinking-water (GLAAS) 2019 report. Geneva: World Health Organization; 2019. URL: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/326444/9789241516297-eng.pdf?ua=1>, accessed 24 June 2020.
3. Glantz M.H. Water security in the changing world. Bulletin WHO. Vol. 67 (1). 2018. URL: <https://public.wmo.int/ru/resources/bulletin>
4. Афанасьев С.О., Васильчук Т.О., Летицька О.М., Білоус О.П. Оцінка екологічного стану річки Південний Буг у відповідності до вимог Водної Рамкової Директиви ЄС. Київ : ТОВ «НВП Інтерсервіс», 2012. 29 с.
5. Хільчевський В.К., Чунарьов О.В., Ромась М.І. Водогосподарська обстановка в басейні р. Південний Буг та вплив на неї Південно-Українського енергокомплексу. *Меліорація і водне господарство*. 2006. № 93-94. С. 63-69.
6. Ухань О.О. Особливості просторово-часового розподілу головних іонів, органічних речовин та біогенних елементів за течією р. Південний Буг. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2016. №.1-2 (25). С. 20-30.
7. Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу / Хільчевський В.К., Чунарьов О.В. та ін.; за ред. В.К. Хільчевського. К.: Ніка-Центр, 2009. 184 с.
8. Ухань О.О., Осадчий В.І., Набиванець Ю.Б., Осадча Н.М., Глотка Д.В. Типізація поверхневих вод басейну Південного Бугу за вмістом головних іонів, біогенних елементів, органічних речовин та розчиненого кисню. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2015. Вип. 267. С. 46–56.
9. Магась Н.І., Трохименко А.Г. Оцінка сучасного антропогенного навантаження на басейн річки Південний Буг. Екологічна безпека. 2013. № 2 (16). С. 48–52.

10. Магась Н.І., Жадан Н.М., Туз Р.В. Визначення екологічно стійких та прийнятних рішень для забезпечення якісного водопостачання м. Миколаїв. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2024. Вип. 2 (53). С. 254-265.
11. Водний кодекс України від 06.06.1995 р. № 213/95-ВР. Чинна редакція від 20.03.2023. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/z950213?an=1>
12. Байцар А. Л. Географія та картографія українських історико-географічних земель (ХІІ ст. – поч. ХХ ст.). Львів-Винники, 2023. 295 с. [https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/08/Baytsar\\_2023.pdf](https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/08/Baytsar_2023.pdf)
13. Вахрушев Б.О. та ін. Рельєф України. За ред. В.В. Стецюка. Київ, 2010. 688 с.
14. Агрокліматичний довідник по Миколаївській області (1986-2005 рр.). Миколаїв. обл. центр з гідрометеорології; За ред. начальника Миколаїв. ЦГМ Л.М. Дуранік і Т.І. Адаменко. Одеса : Астропринт, 2011. 190 с.
15. Магась Н.І., Туз Р.В. Оцінка сучасного гідрологічного стану нижньої ділянки річки Синюха. Матеріали ІХ з'їзду Гідроекологічного товариства України. Дніпро. 2024. С. 86.
16. Горбачова Л.О. Строки та тривалість періодів і сезонів водогосподарського року в басейні річки Південний Буг // *Наук. праці УкрНДГМІ*. – 2013. – Вип. 265. – С. 39-45.
17. Вишневський В.І. Річки і водойми України. Стан і використання. Київ, 2000. 376 с.
18. Гопченко Є.Д., Кічук Н.С., Овчарук В.А. Максимальний стік дощових паводків на річках Півдня України. Одеса: ОДЕКУ, 2016. 212 с.
19. Вишневський В.І., Куций А.В. Багаторічні зміни водного режиму річок України. Київ: Наукова думка, 2022. 252 с.
20. Регіональна доповідь про стан навколишнього середовища у Миколаївській області. Управління екології та природних ресурсів Миколаївської облдержадміністрації. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/ua/ecoreports/regionalreport/>

Стаття надійшла до редакції 18.09.2024 і прийнята до друку після рецензування 09.12.2024

## REFERENCES

1. World water assessment programme. UN World Water Development Report 2022. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2022/>
2. National systems to support drinking-water, sanitation and hygiene: global status report 2019. UN-water global analysis and assessment of sanitation and drinking-water (GLAAS) 2019 report. Geneva: World Health Organization; 2019. Retrieved June, 24, 2020 from <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/326444/9789241516297-eng.pdf?ua=1>
3. Glantz, M.H. (2018). Water security in the changing world. *Bulletin WHO*, 67 (1). Retrieved from <https://public.wmo.int/ru/resources/bulletin>
4. Afanasiev, S.O., Vasylchuk, T.O., Lietytska, O.M., & Bilous, O.P. (2012). Otsinka ekolohichnoho stanu richky Pivdennoi Buh u vidpovidnosti do vymoh Vodnoi Ramkovoї Dyrektyvy YeS. Kyiv: TOV «NVP Interservis» [in Ukrainian].
5. Khilchevskiy, V.K., Chunarov, O.V., & Romas, M.I. (2006). Vodohospodarska obstanovka v baseini r. Pivdennoi Buh ta vplyv na nei Pivdenno-Ukrainskoho enerhokompleksu. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 93-94, 63-69 [in Ukrainian].
6. Ukhan, O.O. (2016). Osoblyvosti prostorovo-chasovoho rozpodilu holovnykh ioniv, orhanichnykh rehovyn ta biohennykh elementiv za techiieiu r. Pivdennoi Buh. *Liudyna ta dovkillia. Problemy neokolohii*, 1-2 (25), 20-30 [in Ukrainian].
7. Khilchevskiy, V.K., Chunarov, O.V. et al. (2009). Vodni resursy ta yakist richkovykh vod baseinu Pivdennoho Buhu. V.K. Khilchevskiy (Ed.). K.: Nika-Tsentr [in Ukrainian].
8. Ukhan, O.O., Osadchyi, V.I., Nabyvanets, Yu.B., Osadcha, N.M., & Hlotka, D.V. (2015). Typizatsiia poverkhnevnykh vod baseinu Pivdennoho Buhu za vmistom holovnykh ioniv, biohennykh elementiv, orhanichnykh rehovyn ta rozchynenoho kysniu. *Naukovi pratsi UkrNDHMI*, 267, 46–56 [in Ukrainian].

9. Mahas, N.I., & Trokhymenko, A.H. (2013). Otsinka suchasnoho antropohennoho navantazhennia na basein richky Pivdennyi Buh. *Ekolohichna bezpeka*, 2 (16), 48–52 [in Ukrainian].
10. Mahas, N. I., Zhadan, N.M., & Tuz, R.V. (2024). Vyznachennia ekolohichno stiikykh ta pryiniatnykh rishen dlia zabezpechennia yakisnoho vodopostachannia m. Mykolaiv. *Ekolohichni nauky: naukovo-praktychnyi zhurnal*, 2 (53), 254-265 [in Ukrainian].
11. Vodnyi kodeks Ukrainy vid 06.06.1995 r. № 213/95-VR. Chynna redaktsiia vid 20.03.2023. Retrieved from <https://ips.ligazakon.net/document/z950213?an=1> [in Ukrainian].
12. Baitsar, A.L. (2023). Heohrafiia ta kartohrafiia ukrainskykh istoryko-heohrafichnykh zemel (XII st. – poch. XX st.). Lviv-Vynnyky. Retrieved from [https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/08/Baitsar\\_2023.pdf](https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/08/Baitsar_2023.pdf) [in Ukrainian].
13. Vakhrushev, B.O. et al. (2010). Relief Ukrainy. V.V. Stetsiuk (ed.). Kyiv [in Ukrainian].
14. Ahroklimatychnyi dovidnyk po Mykolaivskii oblasti (1986-2005 rr.). (2011). L.M. Duranik i T.I. Adamenko (Eds.). Mykolaiv. obl. tsentr z hidrometeorolohii. Odesa: Astroprint [in Ukrainian].
15. Mahas, N.I., & Tuz, R.V. (2024). Otsinka suchasnoho hidrolohichnoho stanu nyzhnoi dilianky richky Syniukha. Materialy IX zizdu Hidroekolohichnoho tovarystva Ukrainy. Dnipro [in Ukrainian].
16. Horbachova, L.O. (2013). Stroky ta tryvalist periodiv i sezoniv vodohospodarskoho roku v baseini richky Pivdennyi Buh. *Nauk. pratsi UkrNDHMI*, 265, 39-45 [in Ukrainian].
17. Vyshnevskiy, V.I. (2000). Richky i vodoimy Ukrainy. Stan i vykorystannia. Kyiv.
18. Hopchenko, Ye.D., Kichuk, N.S., & Ovcharuk, V.A. (2016). Maksymalni stik doshchovykh pavodkiv na richkakh Pivdnia Ukrainy. Odesa: ODEKU [in Ukrainian].
19. Vyshnevskiy, V.I., & Kutsyi, A.V. (2022). Bahatorichni zminy vodnoho rezhymu richok Ukrainy. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
20. Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho seredovyscha u Mykolaivskii oblasti. Upravlinnia ekolohii ta pryrodnykh resursiv Mykolaivskoi obldierzhadministratsii. Retrieved from <https://ecolog.mk.gov.ua/ua/ecoreports/regionalreport/> [in Ukrainian].

*The article was received 18.09.2024 and was accepted after revision 09.12.2024*

**Магась Наталія Іванівна**

к.т.н., доцент кафедри екології та природоохоронних технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Адреса робоча:** пр. Героїв України, 9, 54025, м. Миколаїв, Україна

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

**Туз Руслан Васильович**

начальник відділу водного кадастру та техногенно-екологічної безпеки Регіонального офісу водних ресурсів у Миколаївській області

**Адреса робоча:** вул. Потьомкінська, 14, 54001, м. Миколаїв, Україна

**e-mail:** [mk\\_vodres@davr.gov.ua](mailto:mk_vodres@davr.gov.ua)

УДК 504.4.054:351.777

**Alla Shybanova**, PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity of Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0364-7056> **e-mail:** [ashybanova16@gmail.com](mailto:ashybanova16@gmail.com)

**Maria Ruda**, PhD, Associate Professor at the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity of Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0590-4589> **e-mail:** [marichkarmv@gmail.com](mailto:marichkarmv@gmail.com)

**Elvira Dzhumelia**, PhD, Assistant Professor at the Department of Software of Institute of Computer Science and Information Technologies

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3146-8725> **e-mail:** [elvira.a.dzhumelia@lpnu.ua](mailto:elvira.a.dzhumelia@lpnu.ua)

**Pavlo Panchuk**, Student of the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity  
**e-mail:** [pavlo.panchuk.pi.2022@lpnu.ua](mailto:pavlo.panchuk.pi.2022@lpnu.ua)

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

## ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL CONDITION OF AQUATIC ECOSYSTEMS OF THE WEST BUG BASIN

**Abstract.** *In the modern conditions of the development of the economy of Ukraine, research in the field of analysis and forecasting of the quality of surface waters and their evaluation from an ecological point of view is necessary. The qualitative state of surface water and its assessment must be taken into account in water supply, land reclamation, in communal, agricultural and fisheries, production of industrial products, recreation, sanatorium-resort development, etc.*

*The purpose of the study is to assess the ecological state of the surface water bodies of the Western Bug basin in the territory of the Chervonohrad Territorial Community. In order to assess the degree of exceeding the MPC of the indicators of the quality of water bodies of the surface waters of the Chervonohrad TC in 2018-2022, the values of the average annual concentrations of pollutants were compared with their MPC. The water pollution index was calculated, which made it possible to compare the water quality of various water bodies with each other, regardless of the presence of various pollutants, and to identify the trend of changes in water quality over time.*

*According to some indicators of the quality of surface water (content of ammonium salts, nitrites, dissolved oxygen, BOD<sub>5</sub> indicator), the waters of the Western Bug and Rata rivers in 2018-2022 do not meet the standards. Most of the considered indicators during 2018-2022 in the control body of the Western Bug River have a general upward trend, which indicates the instability of the ecological situation of the basin. For the Rata River, this trend is not so pronounced. In the Western Bug River in 2018-2019, the state of water is assessed as III quality class and the water is assessed as moderately polluted, but in 2020, a sharp deterioration of water quality to IV class – polluted water is recorded. By 2021, a slight decrease in the water pollution index is recorded, but everything remains at the same IV water quality class as in 2022. In the Rata River in 2018-2019, the water quality is rated as II quality class, the water is clean, but in 2020-2022, the water pollution index increases to III quality class, the water is moderately polluted. The obtained results indicate the need to apply nature protection measures to preserve and improve the ecological condition of the river network.*

**Key words:** *Western Bug River, maximum permissible concentration, water quality indicator, water pollution index, water quality class.*

А.М. Шибанова, М.В. Руда, Е.А. Джумеля, П.Г. Панчук

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

## ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ БАСЕЙНУ ЗАХІДНОГО БУГУ

***Анотація.** У сучасних умовах розвитку економіки України є необхідними дослідження у сфері аналізу й прогнозування якості поверхневих вод та їх оцінки з екологічної точки зору. Якісний стан поверхневих вод та його оцінку потрібно враховувати при водопостачанні, меліорації, у комунальному, сільському та рибному господарстві, виробництві промислової продукції, рекреації, санаторно-курортному розвитку тощо. Екологічна оцінка стану природних водних об'єктів дозволить вчасно вживати заходів щодо попередження їх забруднення.*

*Метою дослідження є оцінювання екологічного стану поверхневих водних об'єктів басейну Західного Бугу на території Червоноградської територіальної громади.*

*Для оцінювання ступеня перевищення ГДК показників якості водних об'єктів поверхневих вод Червоноградської ОТГ у 2018-2022 роках порівняно значення середньорічних концентрацій забруднювальних речовин з їх ГДК. Розраховано індекс забрудненості води, що дозволило виконати порівняння якості води різних водних об'єктів між собою незалежно від наявності різних забруднювальних речовин та виявити тенденцію змін в якості води в часі.*

*За окремими показниками якості поверхневих вод (вмістом амонію сольового, нітритів, розчиненого кисню, показником БСК<sub>5</sub>) води річок Західний Буг та Рата в 2018-2022 роках не відповідають нормам. Більшість розглянутих показників впродовж 2018-2022 років у контрольному створі річки Західний Буг мають загальну тенденцію до зростання, що свідчить про нестабільність екологічної ситуації басейну. Для річки Рата така тенденція не настільки яскраво виражена.*

*В річці Західний Буг стан води в 2018-2019 роках оцінюється III класом якості і вода оцінюється як помірно забруднена, але в 2020 році фіксується різке погіршення якості води на IV клас – забруднена вода. До 2021 року фіксується незначне зменшення індексу забрудненості води, але залишається все на тому ж IV класі якості води, як і в 2022 році. В річці Рата в 2018-2019 роках якість води оцінюється II класом якості, вода чиста, але в 2020-2022 роках індекс забрудненості води зростає до III класу якості, вода помірно забруднена. Отримані результати вказують на необхідність застосування природоохоронних заходів для збереження та покращення екологічного стану річкової мережі.*

***Ключові слова:** річка Західний Буг, гранично допустима концентрація, показник якості води, індекс забрудненості води, клас якості води.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.35-47>

### Вступ

Західний Буг – транскордонна річка, басейн якої розташований на території трьох держав: Республіки Польщі (49,2% площі), України (27,4%), Республіки Білорусь (23,4%). Річка Західний Буг відноситься до двадцяти найбільших річок України і є єдиною рікою, яка впадає в Балтійське море. Загальна площа басейну – 73 470 км<sup>2</sup>. На території України річка протікає через дві

адміністративні області: Львівську та Волинську (рис. 1). Площа водозбірного басейну української частини Західного Бугу 140 км<sup>2</sup>, довжина – 401 км (загальна довжина – 772 км) [1]. Найбільші притоки – Золочівка, Полтва, Рата, Солокія, Білосток, Луга. Вздовж берегової смуги розташовано 45 населених пунктів. Ріка Західний Буг потрапила у перелік 5 найбільш забруднених річок України.

У річку Західний Буг вливаються води двох його великих приток – Рати та Солокії на ділянці Добровірів-Червоноград, тому значно збільшується водність річки. В минулому на ділянці Західного Бугу, починаючи від Червонограду, існувала навігація. Витоки річок Рата та Солокія знаходяться у Польщі, але основна частина басейну Рати та до 40% площі басейну Солокії розташовані на території України.

У сучасних умовах розвитку економіки України є необхідними дослідження у сфері аналізу й прогнозування якості поверхневих вод та їх оцінки з екологічної точки зору.

Екологічний стан поверхневих і підземних джерел водопостачання не покращується, незважаючи на істотне скорочення обсягів водокористування та відповідне зменшення техногенного навантаження на водні об'єкти. Щороку у поверхневі водні об'єкти країни скидаються великі об'єми недостатньо очищених комунально-побутових і промислових стічних вод, що є наслідком неефективності систем очищення води [2-5].



Рис. 1. Географічне розташування басейну річки Західний Буг

Забруднення води викликає деградацію річок, водосховищ, озерних систем та погіршення якості води, що негативно впливає на здоров'я людей – через їжу, пиття, вмивання, купання у забруднених водоймах [6-11].

Однією з територіальних громад, через яку протікає річка Західний Буг, є Червоноградська ОТГ. До складу громади входять 2 міста, 1 селище та 11 сіл. Екологічні проблеми є дуже гострими у всіх гірничодобувних регіонах [12-15]. Близько 80% техногенного навантаження Червоноградського гірничопромислового району лягло на невелику його частину – межиріччя річки Рати і річки Західний Буг. Тут розташовано 9 вугільних шахт, основний відстійник шахтних вод, побудовано Центральну збагачувальну фабрику.

Основними джерелами прямого скидання стічних вод у річки басейну Західного Бугу є 17 підприємств житлово-комунального господарства регіону (38% всіх точкових джерел забруднення).

Головні джерела забруднення води р. Західний Буг – комунальне господарство, підприємства якого скидають 80% загальних стоків, промисловість – 10,6%, сільське господарство – 8,7% [16].

Якісний стан поверхневих вод Червоноградської ОТГ та його оцінку потрібно враховувати при водопостачанні, меліорації, у комунальному, сільському та рибному господарстві, виробництві промислової продукції, рекреації, санаторно-курортному розвитку тощо.

Систематизація та аналіз накопиченого досвіду розроблення узагальнюючих показників якості води й обґрунтування доцільності їх застосування в широкому спектрі наукових і практичних робіт з охорони водних ресурсів залишаються актуальними завданнями.

**Мета дослідження** – оцінювання екологічного стану поверхневих водних об'єктів басейну Західного Бугу на території Червоноградської територіальної громади.

**Методи досліджень.** Методика оцінювання якості води за комплексним показником – індексом забрудненості води (ІЗВ) була рекомендована для використання підрозділам Держкомгідромету [17]. Це одна із найпростіших методик комплексного оцінювання якості води. Оцінювання за показником ІЗВ дає змогу виконати порівняння якості води різних водних об'єктів між собою, незалежно від наявності різних забруднювальних речовин, виявити тенденцію змін в якості води в часі.

ІЗВ розраховується за формулою (1).

$$ІЗВ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ГДК_i}, \quad (1)$$

де  $C_i$  – середня концентрація одного із  $n$  показників якості води;  $ГДК_i$  – гранично допустима концентрація кожного з  $n$  показників якості води.

Зазвичай ІЗВ розраховують за шістьма-сімома гідрохімічними показниками, обов'язковими є: склад розчиненого кисню, водневий показник, біохімічне споживання кисню та інші.

Вихідними даними для виконання роботи слугували матеріали лабораторного аналізу води контрольних створів, проведеного спеціалістами Департаменту екології та природних ресурсів у Львівській області [18].

Таблиця 1. Критерії оцінювання якості вод за ІЗВ

<i>Клас якості води</i>	<i>Величина ІЗВ</i>	<i>Текстовий опис</i>
I	< 0,3	Дуже чиста
II	> 0,3–1	Чиста
III	> 1–2,5	Помірно забруднена
IV	> 2,5–4	Забруднена
V	> 4–6	Брудна
VI	> 6–10	Дуже брудна
VII	> 10	Надзвичайно брудна

Для порівняння якості води у різних створах, визначення їх динаміки використовують як критерії класи якості води:

1. До I класу відносяться води, на які найменше впливає антропогенне навантаження. Величини їх гідрохімічних та гідробіологічних показників близькі до природних значень для даного регіону.

2. Для вод II класу характерні певні зміни порівняно з природними, однак ці зміни не порушують екологічної рівноваги.

3. До III класу відносять води, які знаходяться під значним антропогенним впливом, рівень якого близький до межі стійкості екосистем.

4. Води IV-VII класів – це води з порушеними екологічними параметрами, їх екологічний стан оцінюється як екологічний регрес.

Для оцінювання ступеня перевищення ГДК показників якості водних об'єктів поверхневих вод Червоноградської ОТГ у 2018-2022 роках порівняно значення середньорічних концентрацій забруднювальних речовин з їх ГДК.

## Результати дослідження

Впродовж 2018-2022 років було зібрано дані про середньорічні концентрації забруднювальних речовин у контрольних створах водних об'єктів поверхневих вод Червоноградської ОТГ (контрольний створ річки Західний Буг розташований у м. Червоноград, річки Рата – у с. Межиріччя). На рис. 2-7 показано зміну вмісту забруднювальних речовин в поверхневих водах Червоноградської ОТГ.

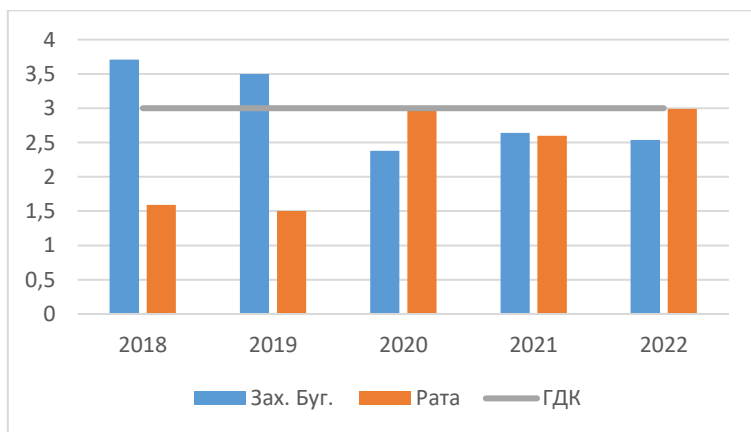


Рис. 2. Показник БСК<sub>5</sub> в поверхневих водах на території м. Червоноград та с. Межиріччя (контрольний створ для річки Західний Буг у м. Червоноград та річки Рата у с. Межиріччя)



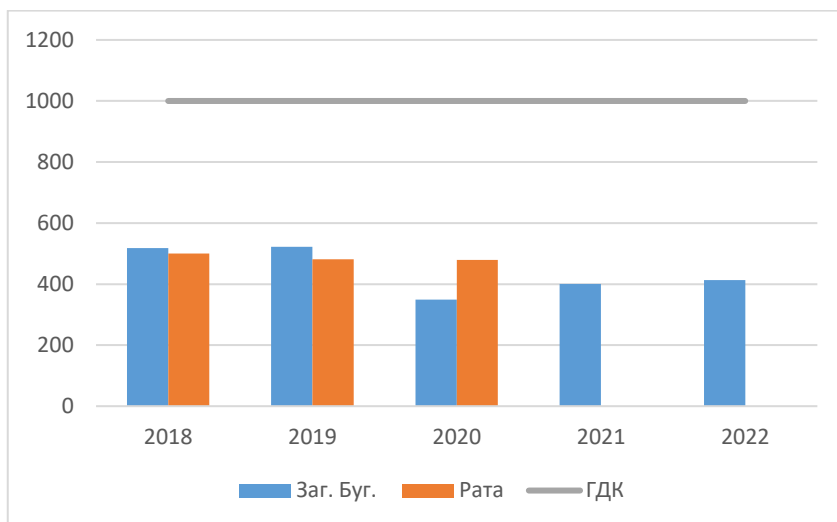


Рис. 3. Показник мінералізації (мг/л) поверхневих вод на території Червоноградської ОТГ (контрольний створ для річки Західний Буг у м. Червоноград та річки Рата у с. Межиріччя)

У річках Західний Буг і Рата в 2018-2022 роках не зафіксовано перевищень ГДК за показником мінералізації (рис. 3).

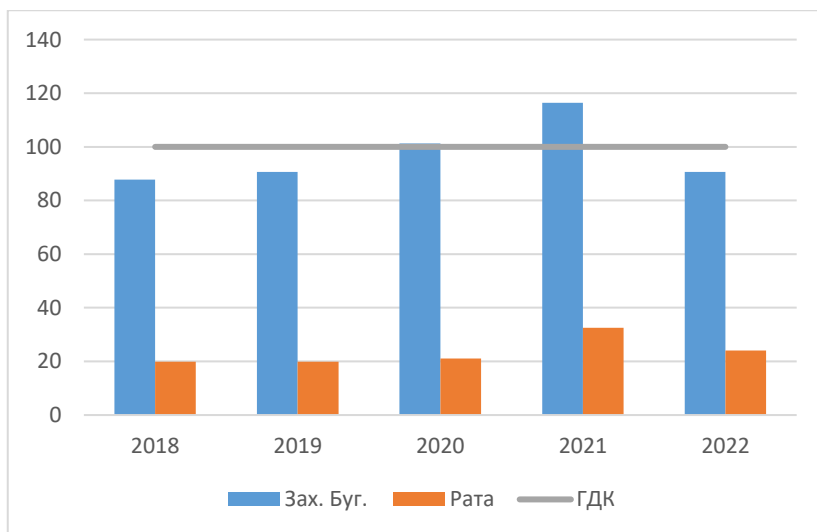


Рис. 4. Вміст сульфатів (мг/л) в поверхневих водах на території Червоноградської ОТГ (контрольний створ для річки Західний Буг у м. Червоноград та річки Рата у с. Межиріччя)

У річці Західний Буг зафіксовано поступове підвищення вмісту сульфатів у 2018-2019 роках, надалі збільшення в 2020 році до рівня ГДК і в 2021 році перевищення становило 1,16 раза від норм ГДК (рис. 4). А до 2022 року зменшилось до рівня нижче ГДК. В річці Рата вміст сульфатів знаходився на мінімальному рівні.

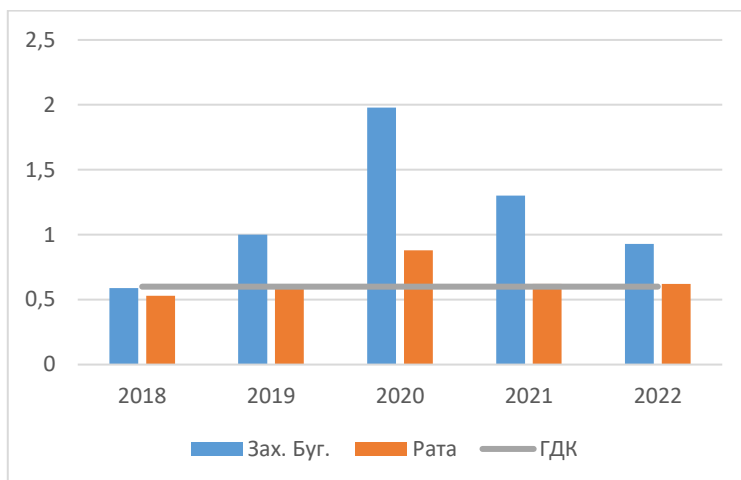


Рис. 5. Вміст амонію сольового (мг/л) в поверхневих водах на території ОТГ Червоноград (контрольний створ для річки Західний Буг у м. Червоноград та річки Рата у с. Межиріччя)

У річці Західний Буг в 2018 році не було зафіксовано перевищення вмісту амонію сольового від норми ГДК, перевищення з'являються в 2019 році в 1,66 раза, в 2020 році перевищення вмісту амонію сольового становило 3,3 раза, зафіксовано його зменшення в 2021 році до 2,16 раза, в 2022 році – до 1,55 раза від норми ГДК (рис. 5).

В Річці Рата в 2018-2019 роках та 2021-2022 роках не зафіксовано перевищення вмісту амонію сольового від норми ГДК. В 2020 році перевищення вмісту амонію сольового становило 1,46 раза.

У 2018 році в річці Західний Буг зафіксовано перевищення вмісту розчиненого кисню в 1,81 раза, його зменшення в 2019 році – у 1,65 раза, в 2020 році – в 1,59 раза від норми ГДК (рис. 6). В 2021 році перевищення зросло до 2,11 раза, а в 2022 році – до 2,12 раза від норми ГДК.

В річці Рата зафіксовано перевищення вмісту розчиненого кисню в 2018-2022 роках у 1,85-2,47 раза від норми ГДК.

В річці Рата зафіксовано, починаючи з 2018 до 2019 років, поступове збільшення вмісту нітритів (рис. 7), однак вміст нітритів знаходився ще на рівні ГДК. В 2020-2021 роках фіксується збільшення і утримування на рівні 1,62 раза від норми ГДК, а в 2022 році перевищення збільшилось до 1,9 раза від норми ГДК.

У річці Західний Буг зафіксовано перевищення вмісту нітритів в 2018 році в 1,81 раза, його зменшення в 2019 році – до 1,5 раза від норми ГДГ (рис. 7). Також зафіксовано збільшення вмісту нітритів в 2020 році до 3,25 раза і різке збільшення в 2021 році до 8,12 раза, з 2022 року – до 8,81 раза від норми ГДК.

Отже, за окремими показниками якості поверхневих вод (вмістом амонію сольового, нітритів, розчиненого кисню, показником БСК<sub>5</sub>) води річок Західний Буг та Рата в 2018-2022 роках не відповідають нормам.

Слід зазначити, що більшість розглянутих показників впродовж 2018-2022 років у контрольному створі річки Західний Буг мають загальну тенденцію до зростання, що свідчить про нестабільність екологічної ситуації басейну. Для річки Рата така тенденція не настільки яскраво виражена.

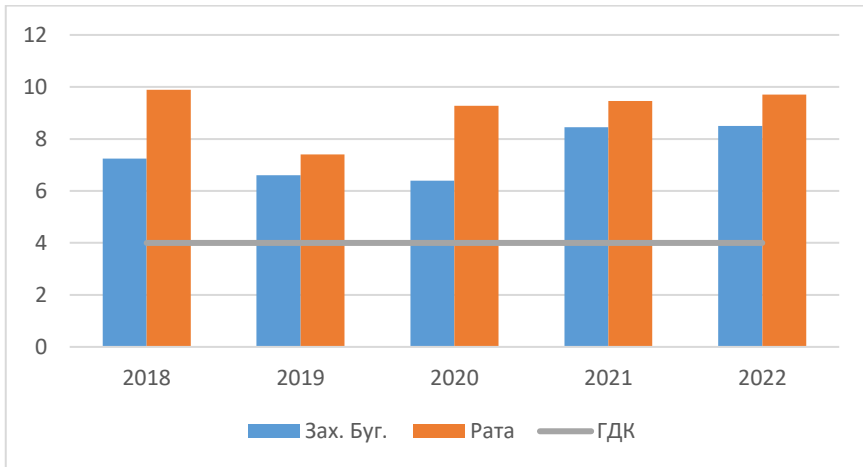


Рис. 6. Вміст розчиненого кисню (мг/л) в поверхневих водах на території Червоноградської ОТГ (контрольний створ для річки Західний Буг у м. Червоноград та річки Рата у с. Межиріччя)

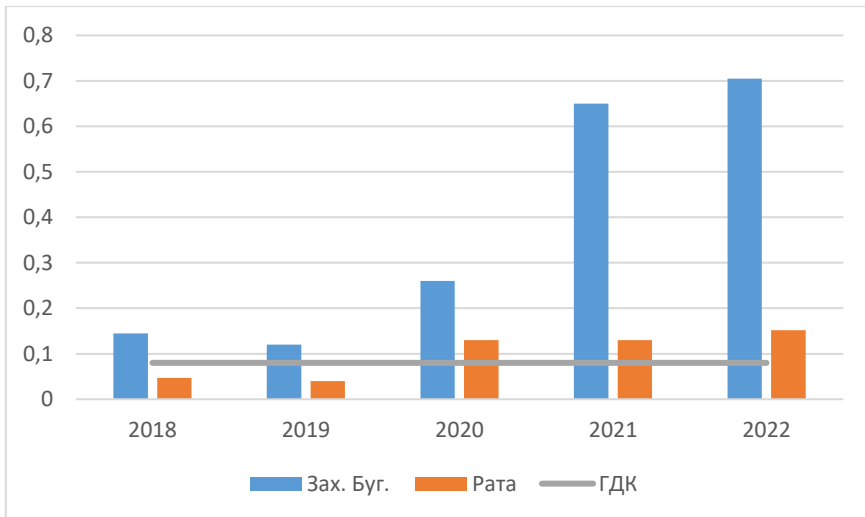


Рис. 7. Вміст нітритів (мг/л) в поверхневих водах на території Червоноградської ОТГ (контрольний створ для річки Західний Буг у м. Червоноград та річки Рата у с. Межиріччя)

*Визначення класу якості поверхневих вод за індексом забрудненості води*

На рисунку 8 показано, що в річці Західний Буг стан води в 2018-2019 роках оцінюється III класом якості і вода оцінюється як помірно забруднена, але в 2020 році фіксується різке погіршення якості води на IV клас – забруднена вода (табл. 2, 3). До 2021 року фіксується незначне зменшення індексу забрудненості води, але залишається все на тому ж IV класі якості води, як і в 2022 році.

У річці Рата в 2018-2019 роках якість води оцінюється II класом якості, вода чиста, але в 2020-2022 роках індекс забрудненості води зростає до III класу якості, вода помірно забруднена.

Таблиця 2. Індекс забрудненості поверхневих вод в контрольному створі м. Червоноград для річки Західний Буг

<i>Роки</i>	<i>Значення ІЗВ</i>	<i>Клас якості води</i>	<i>Текстовий опис</i>
2022	3,48	IV	Забруднена
2021	3,4	IV	Забруднена
2020	4	IV	Забруднена
2019	1,16	III	Помірно забруднена
2018	1,25	III	Помірно забруднена

Таблиця 3. Індекс забрудненості поверхневих вод в контрольному створі с. Межиріччя для річки Рата

<i>Роки</i>	<i>Значення ІЗВ</i>	<i>Клас якості води</i>	<i>Текстовий опис</i>
2022	1,54	III	Помірно забруднена
2021	1,5	III	Помірно забруднена
2020	1,19	III	Помірно забруднена
2019	0,53	II	Чиста
2018	0,64	II	Чиста

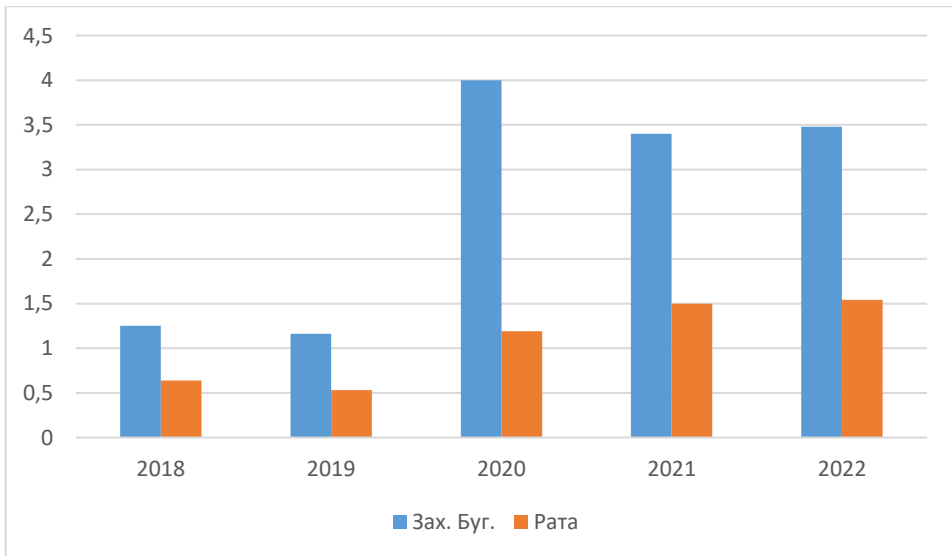


Рис. 8. Індекс забрудненості поверхневих вод Червоноградської ОТГ

## Висновки

Проаналізовано стан річок в період 2018-2022 років у контрольних створах водних об'єктів поверхневих вод Червоноградської ОТГ (контрольний створ річки Західний Буг розташований у м. Червоноград, річки Рата – у с. Межиріччя).

За окремими показниками якості поверхневих вод (вмістом амонію сольового, нітритів, розчиненого кисню, показником БСК<sub>5</sub>) води річок Західний Буг та Рата в 2018-2022 роках не відповідають нормам. Слід зазначити, що більшість розглянутих показників впродовж 2018-2022 років у контрольному створі річки Західний Буг мають загальну тенденцію до зростання, що свідчить про нестабільність екологічної ситуації басейну. Для річки Рата така тенденція не настільки яскраво виражена. В річці Західний Буг стан води в 2018-2019 роках оцінюється III класом якості і вода оцінюється як помірно забруднена, але в 2020 році фіксується різке погіршення якості води на IV клас – забруднена вода. До 2021 року фіксується незначне зменшення індексу забрудненості води, але залишається все на тому ж IV класі якості води, як і в 2022 році. В річці Рата в 2018-2019 роках якість води оцінюється II класом якості, вода чиста, але в 2020-2022 роках індекс забрудненості води зростає до III класу якості, вода помірно забруднена.

Отримані результати вказують на необхідність застосування природоохоронних заходів для збереження та покращення екологічного стану річкової мережі. Такі заходи передбачають модернізацію очисних споруд промислових підприємств та підприємств комунального господарства, збільшення лісистості в басейні річки, рекультивацію порушених земель, зменшення використання мінеральних добрив. Також сприятиме вирішенню даного важливого питання сувора законодавчо встановлена відповідальність за забруднення поверхневих вод господарсько-побутовими стоками від приватного сектору, сільськогосподарського виробництва та виробничими стоками.

### **Подяка**

Цю роботу підготовлено завдяки грантовій підтримці Національного Фонду Досліджень України, реєстраційний номер проєкту 0123U103529 (2022.01/0009) «Оцінювання та прогнозування загроз відбудові та сталому функціонуванню об'єктів критичної інфраструктури» за конкурсом «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Географічна енциклопедія України (1990). В 3-х т. (Т. 2: З – О). О. М. Маринич (Ред.). Київ: Українська радянська енциклопедія ім. М. П. Бажана.
2. Мітрясова, О., Погребенник, В., Шибанова, А., & Джумеля, Е. (2022). Оцінювання екологічного стану водного об'єкта за гідрохімічними показниками. *Екологічна безпека та природокористування*, 41(1), 18–30. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.18-30>.
3. Мітрясова, О. П., Погребенник, В. Д., Шибанова, А. М., & Джумеля, Е. А. (2022). Визначення стану водного об'єкту як умова попередження екологічного ризику. У Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022: Колективна монографія (с. 383–393). Дніпро: Середняк Т. К.
4. Мітрясова, О. П., Шибанова, А. М., & Джумеля, Е. А. (2022). Оцінювання стану водного об'єкту як умова попередження екологічного ризику. У Подолання екологічних ризиків і загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022: Збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції (26–27 травня 2022 року, Полтава – Львів) (с. 424–427). Полтава: НУПП.

5. Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., Bezsonov, Y., & Mats, A. (2021). Environmental risk and state of surface water resources. In *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph* (pp. 279–288). Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT.
6. Шибанова, А. М., Погребенник, В. Д., Мітрясова, О. П., Руда, М. В., Джумеля, Е. А., & Паславський, М. М. (2021). Екологічне оцінювання якості води річки Дністер. *Науковий вісник НЛТУ України*, 31(5), 74–78.
7. Pohrebennyk, V., Mitryasova, O., Shybanova, A., & Ruda, M. (2021). Assessment of the environmental condition of the Dnister river basin under climate change. In *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph* (pp. 321–336). Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT.
8. Погребенник, В. Д., & Джумеля, Е. А. (2018). Вплив промислових відходів на якість води. У *Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання: Збірник наукових статей сімнадцятої міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 24–25 травня 2018 р.)* (с. 156–159).
9. Мацуська, О. В., Сухорська, О. П., & Чабан, Я. М. (2018). Аналіз динаміки зміни екологічного стану поверхневих вод Буського району. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького*, 20(89), 79–84.
10. Гопчак, І. В., Басюк, Т. О., & Семенко, Л. О. (2018). Аналіз стану поверхневих вод басейну річки Західний Буг за багаторічний період. *Вісник НУВГП. Серія «Технічні науки»*, 1(81), 40–48.
11. Мельнійчук, М. М., & Горбач, В. В. (2020). Сучасний стан басейну річки Західний Буг у межах Волинської області. *Вісник ОНУ. Серія: Географічні та геологічні науки*, 25(2(37)), 30–43.
12. Rudko, G., & Shkitsa, L. (2002). Ecological consequences of the activity of Western Ukraine mining complexes. *Rocznik AGH, Wiertnictwo Nafta Gaz*, 19(2), 415–418.
13. Погребенник, В. Д., & Джумеля, Е. А. (2022). Екологічна безпека гірничо-хімічних підприємств: Монографія. Житомир: Бук-Друк.
14. Dzhumelia, E., & Pohrebennyk, V. (2021). Study of sustainable development of the territories of mining influence and chemical enterprises based on environmental pollutant control. In *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph* (pp. 93–102). Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT.
15. Шибанова, А. М., Мітрясова, О. П., Руда, М. В., & Джумеля, Е. А. (2022). Транскордонні екологічні загрози техногенного характеру на території Прикарпаття. У *Подолання екологічних ризиків і загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022: Збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції (26–27 травня 2022 року, Полтава – Львів)* (с. 658–660). Полтава: НУПП.
16. Койнова, І. Б. (2015). Геоекологічні наслідки роботи комунального господарства в басейні річки Західний Буг. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, (3-4), 96–102.
17. Хільчевський, В. К., Осадчий, В. І., & Курило, С. М. (2012). *Основи гідрохімії: Підручник*. Київ: Ніка-Центр.
18. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (n.d.). Регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні. Отримано з <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoring/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-seredovyshha-v-ukrayini/>

*Стаття надійшла до редакції 25.09.2024 і прийнята до друку після рецензування 17.12.2024*

## REFERENCES

- [1] Marynych, O. M. (Ed.). (1990). *Heohrafichna entsyklopediya Ukrayiny*. V 3 tomakh. (Tom. 2: Z – O). Ukrayins'ka radyans'ka entsyklopediya im. M. P. Bazhana [in Ukrainian].
- [2] Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., Shybanova, A., & Dzhumelia, E. (2022). Assessment of the environmental status of the water object by hydrochemical indicators. *Environmental Safety and Natural Resources*, 41(1), 18–30. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.18-30> [in Ukrainian].
- [3] Mitryasova, O. P., Pohrebennyk, V. D., Shybanova, A. M., & Dzhumelia, E. A. (2022). Vyznachennya stanu vodnoho ob'yektu yak umova poperedzhennya ekolohichnoho ryzyku. In *Podolannya ekolohichnykh ryzykiv ta zahroz dlya dovkillya v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy – 2022: kolektyvna monohrafiya* (pp. 383–393). Dnipro: Serednyak T.K. [in Ukrainian].
- [4] Mitryasova, O. P., Shybanova, A. M., & Dzhumelia, E. A. (2022). Otsynuyvannya stanu vodnoho ob'yektu yak umova poperedzhennya ekolohichnoho ryzyku. In *Podolannya ekolohichnykh ryzykiv i zahroz dlya dovkillya v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy – 2022: zbirnyk materialiv I Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 424–427). NUPP [in Ukrainian].
- [5] Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., Bezsonov, Y., & Mats, A. (2021). Environmental risk and state of surface water resources. In *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph* (pp. 279–288). Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT.
- [6] Shybanova, A. M., Pohrebennyk, V. D., Mitryasova, O. P., Ruda, M. V., Dzhumelia, E. A., & Paslavs'kyi, M. M. (2021). Ekolohichne otsynuyvannya yakosti vody richky Dnister. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny*, 31(5), 74–78 [in Ukrainian].
- [7] Pohrebennyk, V., Mitryasova, O., Shybanova, A., & Ruda, M. (2021). Assessment of the environmental condition of the Dnister river basin under climate change. In *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph* (pp. 321–336). Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT.
- [8] Pohrebennyk, V. D., & Dzhumelia, E. A. (2018). Vplyv promyslovykh vidkhodiv na yakist' vody. In *Resursy pryrodnykh vod Karpats'koho rehionu. Problemy okhorony ta ratsional'noho vykorystannya: zbirnyk naukovykh statey simnadtsyatoyi mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 156–159) [in Ukrainian].
- [9] Matsus'ka, O. V., Sukhors'ka, O. P., & Chaban, Y. M. (2018). Analiz dynamiky zminy ekolohichnoho stanu poverkhnevykh vod Bus'koho rayonu. *Naukovyy visnyk LNUVMB imeni S. Z. Gzhyts'koho*, 20(89), 79–84 [in Ukrainian].
- [10] Hopchak, I. V., Basyuk, T. O., & Semenko, L. O. (2018). Analiz stanu poverkhnevykh vod baseynu richky Zakhidnyy Buh za bahatorichnyy period. *Visnyk NUVHP, Seriya «Tekhnichni nauky»*, 1(81), 40–48 [in Ukrainian].
- [11] Mel'nychuk, M. M., & Horbach, V. V. (2020). Suchasnyy stan baseynu richky Zakhidnyy Buh u mezhakh Volyns'koyi oblasti. *Visnyk ONU. Ser.: Heohrafichni ta heolohichni nauky*, 25(2[37]), 30–43 [in Ukrainian].
- [12] Rudko, G., & Shkitsa, L. (2002). Ecological consequences of the activity of Western Ukraine mining complexes. *Rocznik AGH, Wiertnictwo Nafta Gaz*, 19(2), 415–418.
- [13] Pohrebennyk, V. D., & Dzhumelia, E. A. (2022). Ekolohichna bezpeka hirnycho-khimichnykh pidpryemstv: monohrafiya. Zhytomyr: Buk-Druk [in Ukrainian].
- [14] Dzhumelia, E., & Pohrebennyk, V. (2021). Study of sustainable development of the territories of mining influence and chemical enterprises based on environmental pollutant control. In *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph* (pp. 93–102). Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT.

- [15] Shybanova, A. M., Mitryasova, O. P., Ruda, M. V., & Dzhumelia, E. A. (2022). Transkordonni ekolohichni zahrozy tekhnohennoho kharakteru na terytoriyi Prykarpattyа. In *Podolannya ekolohichnykh ryzykiv i zahroz dlya dovkillyа v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy – 2022: zbirnyk materialiv I Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 658–660). Poltava: NUPP [in Ukrainian].
- [16] Koynova, I. B. (2015). Heoekolohichni naslidky roboty komunal'noho hospodarstva v baseyni richky Zakhidnyy Buh. Lyudyna ta dovkillyа. *Problemy neoekolohiyi*, (3-4), 96–102 [in Ukrainian].
- [17] Khil'chevs'kyy, V. K., Osadchyy, V. I., & Kurylo, S. M. (2012). *Osnovy hidrokhimiyi: pidruchnyk*. Kyiv: Nika-Tsentr [in Ukrainian].
- [18] Ministerstvo ekolohiyi ta pryrodnykh resursiv Ukrayiny. (n.d.). Rehional'ni dopovidi pro stan navkolyshn'oho pryrodnoho seredovyscha v Ukrayini. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/regionalni-dopovidi-prostan-navkolyshnogo-seredovyscha-v-ukrayini/> [in Ukrainian].

*The article was received 25.09.2024 and was accepted after revision 17.12.2024*

### **Шибанова Алла Николаївна**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»  
**Адреса робоча:** 79013 Україна, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0364-7056> **e-mail:** ashybanova16@gmail.com

### **Руда Марія Віталіївна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»  
**Адреса робоча:** 79013 Україна, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0590-4589> **e-mail:** marichkarmv@gmail.com

### **Джумеля Ельвіра Анатоліївна**

доктор філософії, асистентка кафедри програмного забезпечення Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»  
**Адреса робоча:** 79013 Україна, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3146-8725> **e-mail:** elvira.a.dzhumelia@lpnu.ua

### **Панчук Павло Геннадійович**

студент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»  
**Адреса робоча:** 79013 Україна, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12  
**e-mail:** pavlo.panchuk.pi.2022@lpnu.ua



UDK 502.1:504/628.1:628.4

**Tetiana Tkachenko**, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Labor Protection and Environment

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** [tkachenkoknuba@gmail.com](mailto:tkachenkoknuba@gmail.com)

**Viktoriia Sakhnovska**, PhD student of the Department of Labor Protection and Environment

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2489-7276> **e-mail:** [vsakhnovskaya@gmail.com](mailto:vsakhnovskaya@gmail.com)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## **EXPRESS MONITORING OF ENVIRONMENTAL SAFETY IN UKRAINIAN MUNICIPAL WASTEWATER SYSTEMS DURING WAR**

**Abstract.** *The article is devoted to the study of the environmental safety of wastewater systems in Ukraine, which is characterized by a critical state due to global environmental changes, aging infrastructure, and military aggression. National and international legislation, including the Geneva Conventions regulating the protection of wastewater facilities, has been analyzed. It has been found that military actions have led to large-scale infrastructure destruction, water resource pollution, and a humanitarian crisis.*

*A categorization of wastewater systems based on the impact of military actions is proposed, which allows for the adaptation of response measures to the specific conditions of each region, from express monitoring and prevention in relatively safe zones to the restoration of destruction and preliminary forecasting in active combat zones. An express monitoring method for the environmental safety of wastewater systems has been developed, based on a limited list of key indicators, ensuring efficiency and reliability. Each indicator reflects critical aspects of environmental safety, from the depletion of water resources and soil pollution to energy efficiency and risks to public health. The quantitative assessment of indicators in points, according to the level of environmental hazard, allows for the systematization of data and the identification of the most vulnerable areas of the system. This approach provides a scientifically sound basis for the development of effective measures to minimize the negative impact on the environment and ensure the sustainable functioning of wastewater systems in emergency situations.*

*A retrospective express monitoring of the environmental safety of wastewater systems in Ukraine has been conducted. It has been determined that during the ten-year period of armed conflict in Ukraine, there has been a statistically significant increase in the level of environmental risk in nine regions, while in five regions the indicator remains relatively stable. In the remaining regions, a trend towards risk reduction has been observed. However, the overall environmental situation is characterized as critical, as the vast majority of regions show environmental hazard indicators that exceed permissible norms. The functioning of wastewater systems in these regions poses a threat to the environment and public health, potentially leading to a large-scale environmental catastrophe.*

**Keywords:** *wastewater systems; military actions; monitoring; environmental safety; indicators; planned and urgent measures.*

Т.М. Ткаченко, В.М. Сахновська

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

## ЕКСПРЕС-МЕТОД МОНІТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МУНІЦИПАЛЬНИХ СИСТЕМ ВОДОВІДВЕДЕННЯ УКРАЇНИ ПІД ЧАС ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

***Анотація.** Стаття присвячена дослідженню екологічної безпеки систем водовідведення в Україні, яка характеризується критичним станом через глобальні екологічні зміни, старіння інфраструктури та військову агресію. Проаналізовано національне та міжнародне законодавство, зокрема Женевські конвенції, що регламентують захист об'єктів водовідведення. Виявлено, що воєнні дії призвели до масштабних руйнувань інфраструктури, забруднення водних ресурсів та гуманітарної кризи.*

*Запропонована категоризація систем ВВ за впливом воєнних дій, що дозволяє адаптувати заходи реагування до специфічних умов кожного регіону, від експрес-моніторингу та попередження у відносно безпечних зонах до відновлення руйнувань та попереднього прогнозування в зонах активних бойових дій. Розроблено метод експрес-моніторингу екологічної безпеки систем водовідведення, що базується на обмеженому переліку ключових індикаторів, забезпечує оперативність та достовірність. Кожен індикатор відображає критичні аспекти екологічної безпеки, від виснаження водних ресурсів та забруднення ґрунтів до енергетичної ефективності та ризиків для здоров'я населення. Кількісна оцінка індикаторів у балах, згідно з рівнем екологічної небезпеки, дозволяє систематизувати дані та виявити найбільш вразливі ділянки системи. Цей підхід забезпечує науково обґрунтовану основу для розробки ефективних заходів з мінімізації негативного впливу на довкілля та забезпечення сталого функціонування систем водовідведення в умовах надзвичайних ситуацій.*

*Проведено ретроспективний експрес-моніторинг екологічної безпеки систем водовідведення України. Визначено, що протягом десятирічного періоду збройного конфлікту в Україні спостерігається статистично значуще зростання рівня екологічного ризику в дев'яти областях, тоді як у п'яти областях показник залишається відносно стабільним. У решті регіонів зафіксовано тенденцію до зниження ризику. Однак, загальна екологічна ситуація характеризується як критична, оскільки переважна більшість регіонів демонструє показники екологічної небезпеки, що перевищують допустимі норми. Функціонування систем водовідведення в цих регіонах становить загрозу для довкілля та здоров'я населення, що потенційно може призвести до масштабної екологічної катастрофи.*

***Ключові слова:** системи водовідведення; військові дії; моніторинг; екологічна безпека; індикатори; планові та першочергові заходи.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.48-61>

### Вступ

Екологічна безпека систем водовідведення в Україні характеризується критичним станом, що зумовлено кумулятивним ефектом глобальних екологічних змін [1, 2], старіння об'єктів інфраструктури [3, 4] та деструктивного впливу військової агресії [5]. Україна стикається з унікальним

комплексом проблем, що включають масштабне руйнування інфраструктури [6, 7], забруднення водних ресурсів [6] та необхідність впровадження євроінтеграційних стандартів.

Женевські конвенції 1949 року, зокрема Додаткові протоколи I та II [8-10], у контексті водовідведення регламентують захист об'єктів, необхідних для виживання цивільного населення, що охоплює інфраструктуру водовідведення, від навмисних атак. Руйнування цих систем спричиняє антисанітарні умови, епідеміологічні ризики та забруднення водних ресурсів. Також, відповідно до принципів запобігання надмірним стражданням та захисту довкілля, конвенції забороняють застосування методів ведення війни, що спричиняють довготривале та масштабне забруднення, зокрема скидання неочищених стоків, які створюють загрозу для здоров'я населення та екологічної стійкості [8-10].

Однак станом на початок 2024 року об'єкти водопостачання та водовідведення в Україні продовжують зазнавати активних руйнувань внаслідок воєнних дій, що спричиняє комплексну гуманітарну та екологічну кризу. Масштабні пошкодження критичної інфраструктури, включаючи водопроводи, каналізаційні мережі, насосні станції та очисні споруди (рис. 1), в ряді регіонів призводять до катастрофічного дефіциту питної води та порушення санітарно-гігієнічних норм, що створює пряму загрозу для здоров'я населення та сприяє поширенню інфекційних захворювань [5].

Для забезпечення екологічної безпеки систем водовідведення в Україні необхідний комплексний підхід, що включає модернізацію інфраструктури, удосконалення законодавства, посилення контролю за водокористуванням, міжнародну співпрацю та врахування техногенних факторів.

**Мета роботи.** Дослідження стану екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення України під час військових дій на підставі методу експрес-моніторингу.

**Завдання роботи:**

1. Розробити метод експрес-моніторингу екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення України.
2. Провести дослідження стану муніципальних систем водовідведення України під час військових дій на підставі розробленого методу.

## **Теоретичні основи дослідження**

Усвідомлюючи критичність проблеми, держава активно впроваджує відповідні законодавчі та нормативні акти. Зокрема: Угода про асоціацію між Україною та Європейським Союзом (розділ V, глава 5) передбачає поступове наближення законодавства України до законодавства ЄС у сфері охорони навколишнього середовища, включаючи управління водними ресурсами, а Додаток XXX до Угоди встановлює конкретні директиви ЄС, які Україна зобов'язана імплементувати [11], зокрема Директиву 91/271/ЄЕС "Про очищення міських стічних вод" [12].

Стаття 2 Конвенції «Про охорону та використання транскордонних водотоків та міжнародних озер» регламентує, що сторони вживають усіх відповідних заходів для недопущення, обмеження та зменшення будь-якого транскордонного впливу, а стаття 3 встановлює, що сторони співпрацюють на основі рівності та взаємності, особливо шляхом укладання двосторонніх або

багатосторонніх угод [13]; стаття 13 Конституції України, закріплюючи право власності Українського народу на природні ресурси, встановлює високий рівень захисту водних ресурсів [14].

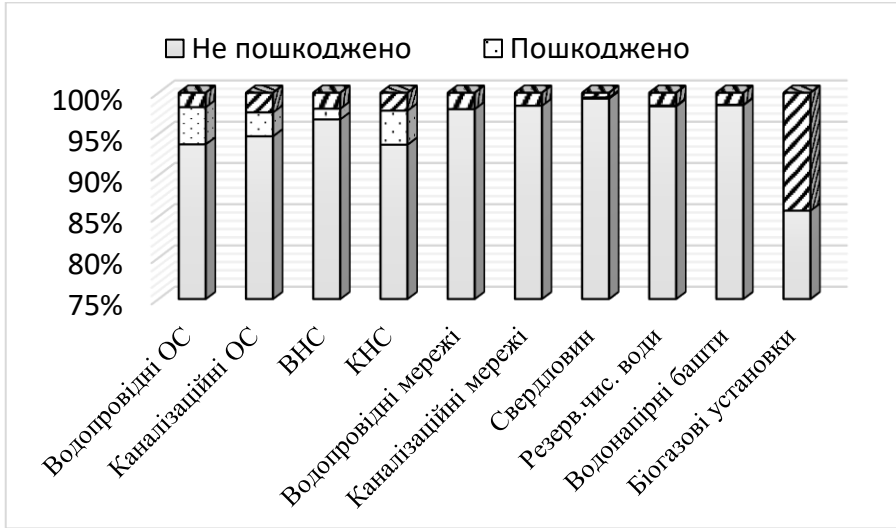


Рис. 1. Пошкодження об'єктів інфраструктури водопостачання та водовідведення станом на початок 2024 року (побудовано за даними [5])

Водний кодекс України, визначаючи всі води національним надбанням (ст. 3), регулює використання, охорону та відтворення водних ресурсів (ст. 1), встановлюючи права (ст. 44) та обов'язки (ст. 48) водокористувачів, регламентуючи охорону вод (ст. 70) та відповідальність за порушення (ст. 110) [15]; Закон України "Про національну безпеку України" [16] та «Стратегія національної безпеки України» [17] визначають погіршення екологічного стану водних басейнів, загострення проблеми транскордонних забруднень і зниження якості води як основні загрози національній безпеці в екологічній сфері, а поліпшення екологічного стану річок України та якості питної води – як один з головних напрямів державної політики з питань національної безпеки; Закон України «Про водовідведення та очищення стічних вод» (ст. 3) визначає правові, економічні та організаційні засади функціонування систем водовідведення (ст. 5, 6) [18]; Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» (ст. 3) визначає завдання законодавства, спрямовані на запобігання негативному впливу господарської діяльності на природні ресурси [19]; пункт 1 розділу III «Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення» [20] вимагає їх відповідності нормам, що гарантують безпечну експлуатацію мереж і споруд та ефективне очищення відповідно до "Правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами" [21]. Водна стратегія України до 2050 року [22] передбачає модернізацію інфраструктури водовідведення, посилення контролю за шкідливими речовинами у стічних водах та удосконалення законодавства згідно з вимогами ЄС. Реалізація цих заходів спрямована на покращення якості послуг водовідведення, досягнення екологічно безпечного стану водних об'єктів та зниження ризиків від повеней та паводків. Стратегія є особливо актуальною в умовах воєнних дій та необхідності інтеграції до ЄС.

Аналіз поточного стану нормативно-правового забезпечення в Україні свідчить про наявність розвинутої системи регулювання охорони та раціонального використання водних ресурсів. Однак, слід підкреслити, що ефективність функціонування зазначеної системи обумовлюється не лише її обсягом, але й якістю імплементації та дієвістю контролю за дотриманням встановлених правових норм.

Вплив збройних конфліктів на водні ресурси та екосистеми є предметом багатьох досліджень [23-29]. Причому для проведення моніторингу муніципальних систем водовідведення державою постійно оновлюються індикатори та методики [15-22, 30]. Однак така оцінка є трудомісткою. В умовах війни, коли інфраструктура руйнується, доступ обмежений, а ресурси вичерпуються, такий моніторинг стає надзвичайно складним, а часом і неможливим. Водночас, забезпечення населення якісною водою стає критично важливим, а відновлення пошкоджених систем водопостачання та водовідведення – першочерговим завданням для збереження екологічної безпеки та життя людей. Для чого необхідно застосування експрес-моніторингу екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення, який буде спиратися на невеликий перелік індикаторів.

### Результати дослідження

Для розробки заходів забезпечення екологічної роботи систем водовідведення в надзвичайних умовах пропонується поділити їх на категорії (таблиця 1).

Таблиця 1. Категорії систем ВВ України за впливом воєнних дій

Категорія	Пояснення	Вид заходів
I категорія	Системи, що знаходяться на територіях, де не відбувалися воєнні дії	Експрес-моніторинг, моніторинг. Попередження, розробка першочергових та планових заходів інтенсифікації роботи систем ВВ
II категорія	Системи, що знаходяться на територіях, де відбувалися воєнні дії, але звільнені	Експрес-моніторинг, моніторинг відновлення руйнувань, прогнозування. Попередження, розробка першочергових та планових заходів інтенсифікації роботи систем ВВ
III категорія	Системи, що знаходяться на території триваючих воєнних дій	Експрес-моніторинг, відновлення руйнувань, попередження, прогнозування
IV категорія	Системи, що знаходяться на непідконтрольних територіях	Попереднє прогнозування

За даними Deep State [31] та Переліку [32], станом на 01 січня 2025 року системи водовідведення центральної та західної України за впливом воєнних дій можна було віднести до першої та другої категорії, півдня та сходу – до об'єктів третьої та четвертої категорії.

Для проведення експрес-моніторингу пропонується використовувати невеликий перелік індикаторів, які, з одного боку, дозволять достовірно оцінити екологічний стан існуючих систем водовідведення, а з іншого боку, є статистичною інформацією муніципальних підприємств і не потребують додаткових досліджень: питоме водоспоживання (I1) та водовідведення (I2), забезпечення послугами водовідведення (I3), стан мереж водовідведення (I4), питомі витрати електроенергії (I5), наявність ексфільтрації та додаткового притоку стічних вод (I6), стан КНС (I7) та очисних споруд (I8), наявність скиду неочищених стічних вод до навколишнього середовища (I9).

На першому кроці експрес-моніторингу згідно з відкритими джерелами [33-34] отримуємо вихідні дані для 2013 року та 2023 року за визначеними індикаторами.

Для індикаторів 5 та 9 значення відображаються в абсолютних та відносних показниках відповідно. Для індикаторів 1-4, 6-8 значення виставляються в балах відповідно до рівня ризику екологічної небезпеки, що дозволяє кількісно оцінити потенційний негативний вплив на довкілля та здоров'я населення (таблиця 2).

Таблиця 2. Ризик екологічної небезпеки для індикаторів 1-4, 6-6 [18, 20, 22, 37]

№ індикатора	Показник	Од. виміру	Ризик екологічної небезпеки		
			Низький	Середній	Високий
			2 бали	1 бал	0 балів
1	Питоме водоспоживання	л/добу на людину	[130, 285]	[100, 130) та (285, 305]	< 100 або > 305
2	Питоме водовідведення	л/добу на людину	[130, 285]	[100, 130) та (285, 305]	< 100 або > 305
3	Забезпечення послугами водовідведення	%	сільське населення $\geq 80$ ; міське $\geq 72$	сільське населення – [50; 80), міське – [70; 72)	сільське населення < 50; міське < 70
4	Стан мереж водовідведення	% зносу	$\leq 15$	(15, 60]	> 60
6	Ексфільтрація (E) та додатковий приток (I)	% від загального обсягу	$I \leq 2$ та $E \leq 2$	I (2, 20] та $E \leq 2$	$I > 20$ та $E > 2$
7	Стан каналізаційних насосних станцій	% зносу	$\leq 15$	(15, 60]	> 60
8	Стан очисних споруд водовідведення	% зносу	$\leq 15$	(15, 60]	> 60

На другому етапі експрес-моніторингу, що передбачає застосування MCDM-методів багатокритеріального прийняття рішень [35], здійснюється

нормалізація матриці методом min-max [36], що є необхідною процедурою для усунення впливу різних одиниць вимірювання та діапазонів значень на результати аналізу за формулою (1):

$$I_{norm}^{ij} = \frac{x^{ij} - x_{min}^i}{x_{max}^i - x_{min}^i}; \quad (1)$$

де  $I_{norm}^{ij}$  – нормоване значення  $i$ -того індикатору  $j$ -того муніципального підприємства (населеного пункту, області);

$x^{ij}$  – значення  $i$ -того індикатору  $j$ -того муніципального підприємства (населеного пункту, області);

$x_{min}^i$  – мінімальне значення  $i$ -того індикатору групи муніципальних підприємств (населених пунктів, областей);

$x_{max}^i$  – максимальне значення  $i$ -того індикатору групи муніципальних підприємств (населених пунктів, областей).

Оскільки підвищення енергоспоживання в системах водовідведення спричиняє негативні наслідки для навколишнього середовища, то нормалізацію для п'ятого індикатору здійснюємо за формулою (2):

$$I_{norm}^{5j} = 1 - \frac{x^{5j} - x_{min}^5}{x_{max}^5 - x_{min}^5}; \quad (2)$$

де  $I_{norm}^{5j}$  – нормоване значення 5-того індикатору  $j$ -того муніципального підприємства (населеного пункту, області);

$x^{5j}$  – значення 5-того індикатору  $j$ -того муніципального підприємства (населеного пункту, області);

$x_{min}^5$  – мінімальне значення 5-того індикатору групи муніципальних підприємств (населених пунктів, областей);

$x_{max}^5$  – максимальне значення 5-того індикатору групи муніципальних підприємств (населених пунктів, областей).

На третьому етапі експрес-моніторингу виконується складання нормалізованої матриці на підставі вагових коефіцієнтів, які були визначні матричним методом на підставі графу зв'язності індикаторів та екологічної безпеки мереж водовідведення (рис. 2, таблиця 3).

Наступний етап експрес-методу моніторингу екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення передбачає узагальнення отриманих результатів, визначення рівня ризиків екологічної небезпеки систем водовідведенням  $ER^i$  (3) та ранжування підприємств за цим рівнем (таблиця 4).

$$ER^i = 1 - \sum_{i=1}^n I_{norm}^{ij} \cdot k_z^i. \quad (3)$$

Таблиця 3. Нормалізована матриця даних стану екологічної безпеки систем водовідведення України за 2023 рік

Індикатори		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Область	Вінницька	0,17	0,17	0,00	1,00	0,60	1,00	0,00	1,00	0,53
	Волинська	0,17	0,00	0,01	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,54
	Дніпропетровська	0,83	0,50	0,01	1,00	0,89	0,00	0,00	1,00	0,09
	Донецька	1,00	0,17	0,01	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,24
	Житомирська	0,17	0,17	0,00	1,00	0,48	0,00	0,00	0,50	0,50
	Закарпатська	0,33	0,17	0,01	1,00	0,85	0,00	0,00	0,00	0,38
	Запорізька	0,17	0,00	0,01	0,00	0,73	0,00	1,00	0,00	0,54
	Івано-Франківська	0,00	0,00	0,02	1,00	0,87	0,00	0,00	0,50	0,54
	Київська	0,50	0,00	0,01	1,00	0,64	0,00	0,00	0,00	0,53
	Київ	0,00	0,50	0,02	1,00	0,70	0,00	0,00	0,00	0,49
	Кіровоградська	0,50	0,17	0,01	1,00	0,57	0,00	0,00	0,50	0,00
	Львівська	0,00	0,50	0,01	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54
	Миколаївська	0,17	0,33	0,01	1,00	0,43	0,00	1,00	0,50	0,54
	Одеська	0,67	0,50	0,01	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,48
	Полтавська	0,17	0,50	0,00	1,00	0,68	0,50	0,00	1,00	0,19
	Рівненська	0,00	0,00	0,01	1,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,17
	Сумська	0,33	0,00	0,01	1,00	0,52	0,00	0,00	0,50	1,00
	Тернопільська	0,33	0,17	0,01	1,00	0,56	0,00	0,00	1,00	0,46
	Харківська	0,33	0,00	0,01	0,00	0,82	0,00	0,00	0,00	0,52
	Херсонська	0,83	1,00	0,01	0,00	0,89	0,00	1,00	0,00	0,54
Хмельницька	0,17	0,17	0,00	1,00	0,62	0,00	0,00	0,00	0,54	
Черкаська	0,00	0,17	0,00	1,00	0,77	0,00	0,00	1,00	0,41	
Чернівецька	0,67	1,00	0,00	1,00	0,32	0,00	0,00	0,50	0,49	
Чернігівська	0,00	0,00	0,00	1,00	0,46	0,00	1,00	0,50	0,50	



Рис. 2. Граф впливу індикаторів експрес-моніторингу на екологічну безпеку



Таблиця 4. Визначення рівня екологічного ризику систем водовідведення України за 2023 рік

№ індикатору		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Область	Коефіцієнт значущості	0,1099	0,1868	0,0275	0,3242	0,0055	0,3077	0,0165	0,0165	0,0055
	Вінницька	0,17	0,17	0,00	1,00	0,60	1,00	0,00	1,00	0,53
	Волинська	0,17	0,00	0,01	1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,54
	Дніпропетровська	0,83	0,50	0,01	1,00	0,89	0,00	0,00	1,00	0,09
	Донецька	1,00	0,17	0,01	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,24
	Житомирська	0,17	0,17	0,00	1,00	0,48	0,00	0,00	0,50	0,50
	Закарпатська	0,33	0,17	0,01	1,00	0,85	0,00	0,00	0,00	0,38
	Запорізька	0,17	0,00	0,01	0,00	0,73	0,00	1,00	0,00	0,54
	Івано-Франківська	0,00	0,00	0,02	1,00	0,87	0,00	0,00	0,50	0,54
	Київська	0,50	0,00	0,01	1,00	0,64	0,00	0,00	0,00	0,53
	Київ	0,00	0,50	0,02	1,00	0,70	0,00	0,00	0,00	0,49
	Кіровоградська	0,50	0,17	0,01	1,00	0,57	0,00	0,00	0,50	0,00
	Львівська	0,00	0,50	0,01	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54
	Миколаївська	0,17	0,33	0,01	1,00	0,43	0,00	1,00	0,50	0,54
	Одеська	0,67	0,50	0,01	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,48
	Полтавська	0,17	0,50	0,00	1,00	0,68	0,50	0,00	1,00	0,19
	Рівненська	0,00	0,00	0,01	1,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,17
	Тернопільська	0,33	0,17	0,01	1,00	0,56	0,00	0,00	1,00	0,46
	Харківська	0,33	0,00	0,01	0,00	0,82	0,00	0,00	0,00	0,52
	Херсонська	0,83	1,00	0,01	0,00	0,89	0,00	1,00	0,00	0,54
Хмельницька	0,17	0,17	0,00	1,00	0,62	0,00	0,00	0,00	0,54	
Черкаська	0,00	0,17	0,00	1,00	0,77	0,00	0,00	1,00	0,41	
Чернівецька	0,67	1,00	0,00	1,00	0,32	0,00	0,00	0,50	0,49	
Чернігівська	0,00	0,00	0,00	1,00	0,46	0,00	1,00	0,50	0,50	

Якщо прийняти нульовий рівень екологічного ризику для систем водовідведення як базову лінію, а максимальну потенційну величину ризику як 100%, то проміжні значення у цьому діапазоні кількісно визначають градуйовану шкалу інтенсивності екологічного ризику.

Виконаємо ранжування підприємств за значенням екологічного ризику (*ER*) в порядку зростання, де мінімальні значення *ER* корелюють з низькими екологічними ризиками значення 0-0,33. Значення в інтервалі (0,33-0,67] корелюють з середнім рівнем екологічних ризиків. Тоді як максимальні значення *ER* (0,67-1] відповідають високому ризику та сигналізують про потенційні екологічні загрози, необхідність впровадження термінових заходів, особливо в умовах воєнного часу (таблиця 5).

Таблиця 5. Динаміка змінення екологічного ризику систем водовідведення України за 10 років воєнний дій

Ранг по 2023	Найменування населеного пункту	2013		2023		Динаміка +/-, %
		ER	Висновок	ER	Висновок	
1	2	3	4	5	6	7
1	Вінницька	0,5717	Середній	0,296	Низький	48
18	Волинська	0,5741	Середній	0,651	Середній	-13
4	Дніпропетровська	0,5043	Середній	0,469	Середній	7
22	Донецька	0,5751	Середній	0,855	Високий	-49
12	Житомирська	0,7518	Високий	0,613	Середній	18
11	Закарпатська	0,6229	Середній	0,601	Середній	4
24	Запорізька	0,7557	Високий	0,958	Високий	-27
19	Івано-Франківська	0,7220	Високий	0,659	Середній	9
13	Київська	0,6251	Середній	0,614	Середній	2
7	Київ	0,7056	Високий	0,575	Середній	18
8	Кіровоградська	0,6370	Середній	0,578	Середній	9
9	Львівська	0,7253	Високий	0,579	Середній	20
6	Миколаївська	0,7253	Високий	0,565	Середній	22
5	Одеська	0,5124	Середній	0,501	Середній	2
2	Полтавська	0,7162	Високий	0,389	Середній	46
20	Рівненська	0,5397	Середній	0,671	Високий	-24
16	Сумська	0,7864	Високий	0,622	Середній	21
10	Тернопільська	0,4497	Середній	0,586	Середній	-30
23	Харківська	0,7167	Високий	0,956	Високий	-33
21	Херсонська	0,6121	Середній	0,697	Високий	-14
14	Хмельницька	0,5455	Середній	0,620	Середній	-14
15	Черкаська	0,2105	Низький	0,622	Середній	-195
3	Чернівецька	0,5806	Середній	0,403	Середній	31
17	Чернігівська	0,7179	Високий	0,646	Середній	10

За 10 років збройного конфлікту суттєво підвищився екологічний ризик у 9 областях України, у п'яти областях залишився майже на тому ж рівні. В інших областях спостерігається покращення ситуації (рис. 3). Але ситуація залишається складною, оскільки тільки одна область має низький показник ризику екологічної небезпеки. Функціонування більшості систем є небезпечним для навколишнього середовища та людини та загрожує настанням масштабної екологічної катастрофи.

На підставі розробленого моніторингу слід підготувати першочергові та планові заходи підвищення екологічної безпеки систем водовідведення. До першочергових заходів для всіх областей слід віднести: створення стратегічних запасів реагентів та паливно-мастильних матеріалів, реконструкцію критичної інфраструктури, забезпечення аварійних бригад, розробку планів евакуації стічних вод, встановлення альтернативних джерел електропостачання, фізичний захист об'єктів та навчання персоналу. Також необхідно розрахувати вартість цих заходів та виділити відповідне фінансування. До планових: своєчасний ремонт обладнання та мереж відповідно до розроблених планів, підвищення надійності водовідведення шляхом резервування, будівництво альтернативних джерел

електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії, реконструкція та будівництво об'єктів з урахуванням зниження ризиків, впровадження цифрових технологій для моніторингу та прогнозування, а також застосування "зелених технологій" для регулювання зливових вод та підвищення екологічної стійкості.

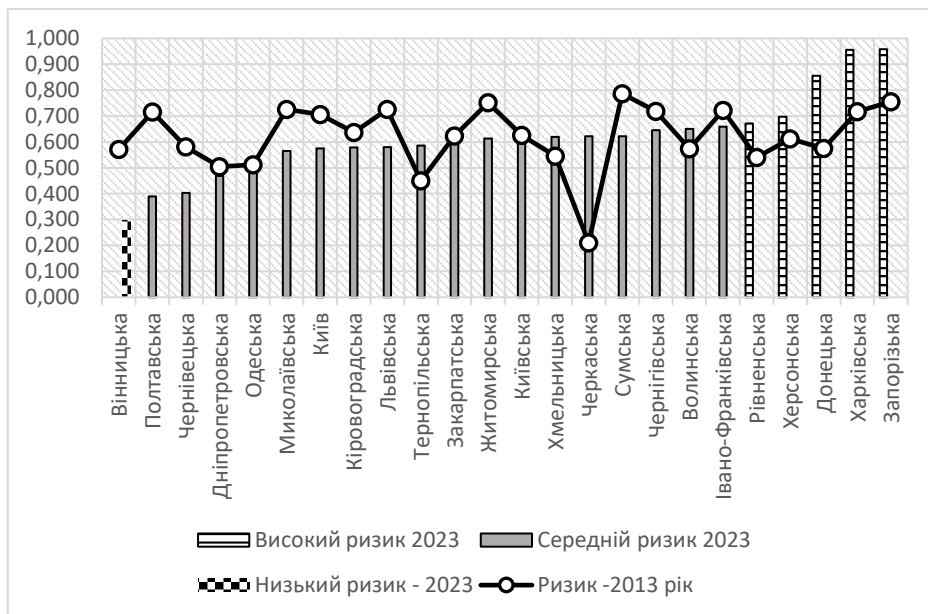


Рис. 3. Динаміка змінення ризиків екологічної небезпеки по областях України в 2013 та 2023 роках

### Висновки та перспективи подальших досліджень

В умовах воєнних дій, коли системи водовідведення зазнають значних пошкоджень та навантажень, критично важливо забезпечити їхню сталу роботу та екологічну безпеку. Запропонована категоризація систем водовідведення за впливом воєнних дій (I-IV категорії) дозволяє адаптувати заходи реагування до специфічних умов кожного регіону, від експрес-моніторингу та попередження у відносно безпечних зонах до відновлення руйнувань та попереднього прогнозування в зонах активних бойових дій. Запропонований метод проведення експрес-моніторингу екологічної безпеки роботи муніципальних систем водовідведення України дозволяє систематизувати дані та виявити найбільш вразливі об'єкти системи.

Використання обмеженого переліку ключових індикаторів, що базуються на доступній статистичній інформації, забезпечує оперативність та достовірність експрес-моніторингу. Кожен індикатор відображає критичні аспекти екологічної безпеки. Кількісна оцінка індикаторів у балах, згідно з рівнем екологічної небезпеки, дозволяє систематизувати дані та виявити найбільш вразливі ділянки системи. Цей підхід забезпечує науково обґрунтовану основу для розробки ефективних заходів з мінімізації негативного впливу на довкілля та забезпечення сталого функціонування систем водовідведення в умовах надзвичайних ситуацій.

Проведений ретроспективний експрес-моніторинг муніципальних систем водовідведення України показав високий ризик екологічної небезпеки в 5 областях України і середній для 18 областей, що свідчить про необхідність впровадження першочергових та планових заходів інтенсифікації роботи систем.

Результати досліджень можуть бути впроваджені в діяльність муніципальних підприємств водопостачання та водовідведення.

## REFERENCES

1. Lin, H. (2014). Changes in atmospheric carbon dioxide. In *Global environmental change* (pp. 61–67). Dordrecht: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5784-4\\_48](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5784-4_48)
2. Brandon, M.A. & Clark, N. H. (Eds.). (2003). *Environmental changes: Global challenges*. Milton Keynes: Open University.
3. UNSD. (n.d.). *Global indicator framework for the sustainable development goals and targets of the 2030 agenda for sustainable development*. [https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202023%20refinement\\_Eng.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework%20after%202023%20refinement_Eng.pdf)
4. Kalbar, P. P., & Lokhande, S. (2023). Need to adopt scaled decentralized systems in the water infrastructure to achieve sustainability and build resilience. *Water Policy*. <https://doi.org/10.2166/wp.2023.267>
5. KSE. (2024). *Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року* [Report on direct infrastructure damage from destruction caused by Russian military aggression against Ukraine as of the beginning of 2024]. Kyiv. [https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24\\_Damages\\_Report.pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf)
6. Babanina, I. (2022). *Зруйнована інфраструктура водопостачання та водовідведення на Сході та Півдні України: Аналітична записка* [Destroyed water supply and sewerage infrastructure in the East and South of Ukraine: Analytical note] (O. Kravchenko, Ed.). Ecolohiya, Pravo, Lyudyna. [https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2023/02/rujnuvannya-infrastruktury\\_vychytana-versiya.pdf](https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2023/02/rujnuvannya-infrastruktury_vychytana-versiya.pdf)
7. Pashchenko, O. M., & Hoshtynar, S. L. (2022). International legal principles for guaranteeing water safety during military conflicts. *Environmental Law*, (3-4), 57–62. <https://doi.org/10.37687/2413-7189.2022.3-4-4.12>
8. United Nations. (1999). *Protocol on water and health to the 1992 convention on the protection and use of transboundary watercourses and international lakes*. [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_030#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_030#Text)
9. United Nations. (2005). *Additional protocol to the Geneva conventions of 12 August 1949, and relating to the adoption of an additional distinctive emblem (Protocol III)*. [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_g74#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_g74#Text)
10. Verkhovna Rada of the Ukrainian SSR. (1989). *Decree on the ratification of the additional protocol to the Geneva conventions of 12 August 1949, and relating to the protection of victims of international armed conflicts (Protocol I), and the additional protocol to the Geneva conventions of 12 August 1949, and relating to the protection of victims of non-international armed conflicts (Protocol II)* (Decree No. 7960-XI). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/7960-11#Text>
11. Verkhovna Rada of Ukraine. (2014). *Law of Ukraine on the ratification of the association agreement between Ukraine, of the one part, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their member states, of the other part* (Law No. 1678-VII). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1678-18#Text>
12. European Economic Community. (1991). *Council directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment* (Directive No. 91/271/EEC). [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_911#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_911#Text)

13. United Nations. (1999). *Protocol on water and health to the 1992 convention on the protection and use of transboundary watercourses and international lakes*. [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_030#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_030#Text)
14. Verkhovna Rada of Ukraine. (2001). *Constitution of Ukraine*. Kyiv: Parliamentary Publishing House.
15. Verkhovna Rada of Ukraine. (2004). *Water code of Ukraine*. Kyiv: InYure.
16. Verkhovna Rada of Ukraine. (2018). *Law of Ukraine on national security of Ukraine* (Law No. 2469-VIII). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19#Text>
17. President of Ukraine. (2020). *Decree on the decision of the national security and defense council of Ukraine of September 14, 2020 "On the national security strategy of Ukraine"* (Decree No. 392/2020). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020#Text>
18. Verkhovna Rada of Ukraine. (2023). *Law of Ukraine on wastewater disposal and treatment* (Law No. 2887-IX). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2887-20#Text>
19. Verkhovna Rada of Ukraine. (1999). *Law of Ukraine on environmental protection*. Kyiv: Parliamentary Publishing House.
20. Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine. (2017). *Order on approval of the rules for acceptance of wastewater into centralized sewerage systems and the procedure for determining the amount of payment charged for excess discharges of wastewater into centralized sewerage systems* (Order No. 316). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-18#Text>
21. Cabinet of Ministers of Ukraine. (1999). Resolution on approval of the rules for the protection of surface waters from pollution by return waters (Resolution No. 465). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/465-99-п#Text>
22. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2022). Order on approval of the water strategy of Ukraine for the period up to 2050 (Order No. 1134-p). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-п#Text>
23. Rajkumar, S., et al. (2023). Smart sewage monitoring systems. In Third congress on intelligent systems (pp. 27–40). Singapore: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-9225-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-19-9225-4_3)
24. Utepov, Y., et al. (2024). Advancing sanitary surveillance: Innovating a live-feed sewer monitoring framework for effective water level and chamber cover detections. *Heliyon*, 10(6), e27395. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27395>
25. (n.d.). Monitoring. In *Wastewater microbiology series* (pp. 135–139). Hoboken, NJ, USA: Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471468967.ch22>
26. Peng, C., et al. (2022). Monitoring of wastewater treatment process based on multi-stage variational autoencoder. *Expert Systems with Applications*, 117919. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117919>
27. Lynggaard-Jensen, A. (1999). Trends in monitoring of waste water systems. *Talanta*, 50(4), 707–716. [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(99\)00197-6](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(99)00197-6)
28. Soetedjo, A., et al. (2022). Real-time implementation of wastewater monitoring system on the communal wastewater treatment plant using the IoT technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1030(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1030/1/012006>
29. Wade, M. J., Sánchez, A., & Katebi, M. R. (2005). On real-time control and process monitoring of wastewater treatment plants: Real-time process monitoring. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 27(3), 173–193. <https://doi.org/10.1191/0142331205tm140oa>
30. Nasonkina, N., et al. (2009). Strategy for monitoring and reforming municipal water supply systems. *Water Supply and Sewerage*, 2, 2–8.
31. DeepStateMAP. (n.d.). DeepStateMAP. <https://deepstatemap.live/#6/47.5987553/35.5737305>

32. Ministry of Reintegration of the Temporarily Occupied Territories of Ukraine. (2022). Order on approval of the list of territories where hostilities are (were) conducted or temporarily occupied by the Russian Federation<sup>1</sup> (Order No. 309). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1668-22#Text>
33. Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine. (2014). National report on the quality of drinking water and the state of drinking water supply and sewerage in Ukraine in 2013. Kyiv. <https://mtu.gov.ua/content/nacionalna-dopovid-pro-yakist-pitnoi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostachannya-v-ukraini.html>
34. Ministry of Communities and Territories Development of Ukraine. (2024). National report on the quality of drinking water and the state of drinking water supply and sewerage in Ukraine in 2023. Kyiv. <https://mtu.gov.ua/content/nacionalna-dopovid-pro-yakist-pitnoi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostachannya-v-ukraini.html>
35. Buja, A. (1996). What criterion for a power algorithm? In Robust statistics, data analysis, and computer intensive methods (pp. 49–61). New York, NY: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2380-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2380-1_4)
36. Coulmas, F. (2025). Normalization and standardization. In Language policy (pp. 49–64). Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/9780191976377.003.0004>
37. Ministry of Regional Development of Ukraine. (2013). DBN V.2.5-75:2013.34 Sewerage. External networks and structures. Basic design provisions. [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3200391384846566485?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3200391384846566485?doc_type=2)

*Стаття надійшла до редакції 30.09.2024 і прийнята до друку після рецензування 13.12.2024*

*The article was received 30.09.2024 and was accepted after revision 13.12.2024*

**Ткаченко Тетяна Миколаївна**

д.т.н., професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури  
**Адреса робоча:** 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітрофлотський, 31  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

**Сахновська Вікторія**

аспірантка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури  
**Адреса робоча:** 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітрофлотський, 31  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2489-7276> **e-mail:** vsahnovskaya@gmail.com

УДК 556.3:543.393(477.6)

**Nina Osokina**, Candidate of geol.-min. sciences  
*e-mail*: N.Osokina@gmail.com

Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## **ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF DONBAS: AGRICULTURAL POLLUTANTS AND THE QUALITY OF GROUNDWATER IN DONETSK REGION**

**Abstract.** *Considered environmental problems Donbas region: flooded mines, hand subsidence, radiation, pollution of water resources, shortage of drinking water, etc. Ecocide is taking place as a result of the Russian-Ukrainian war of 2014-2024. The problem of the impact of agriculture on the quality of natural waters of the Donbas region was considered. The presence of pesticides derived from chlorine, organophosphorus, fluorine-containing compounds and pyrethroids was established in all studied environmental objects: drinking and mineral waters, surface waters of lakes Ripne and Slipne, medicinal muds of the resort of the city of Slavyansk. An analysis was conducted and the average values of groundwater quality indicators, sampled in 2023-2024 in the Donetsk region, were determined. Exceedance of the normative values of some indicators according to DSanPIN 2.2.4-171-10 was established. Solving the environmental problems of Donbas requires the liberation of the territories of Ukraine from occupation.*  
**Key word:** *environmental problems, Donbas region, pesticides, quality of natural waters, quality of groundwater.*

**Н.П. Осокіна**

Інститут геологічних наук НАН України, м. Київ, Україна

## **ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ДОНБАСУ: СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ ЗАБРУДНЮВАЧІ ТА ЯКІСТЬ ПІДЗЕМНИХ ВОД ДОНЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ**

**Анотація.** *Розглянуті екологічні проблеми Донбасу: затоплені шахти, просідання землі, радіація, забруднення водних ресурсів, дефіцит питної води та інше. Відбувається екоцид внаслідок Російсько-Української війни 2014-2024 років.*  
*Розглянуто проблему впливу сільського господарства на якість природних вод Донбаського регіону. Встановлено наявність пестицидів похідних хлор-, фосфорорганічних, фторвмісних сполук та піретроїдів у всіх досліджених об'єктах навколишнього середовища: питних та мінеральних водах, поверхневих водах озер Ріпне та Сліпне, лікувальних грязях курорту м. Слов'янськ. Проведений аналіз та визначені середні значення показників якості підземних вод, відібраних у 2023-2024 роках в Донецькій області. Встановлено перевищення нормативних значень деяких показників згідно з ДСанПІН 2.2.4-171-10. Для розв'язання екологічних проблем Донбасу потрібно звільнення територій України від окупації.*  
**Ключові слова:** *екологія, Донбас, пестициди, якість природних вод, якість підземних вод.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.62-68>

## Вступ

Однією з актуальних проблем сучасності є проблема забезпечення населення Донбасу якісною питною водою. Враховуючи незадовільну якість води в поверхневих джерелах, значні витрати на її очищення та неможливість ефективного захисту від техногенних та сільськогосподарських забруднювачів, стратегічного значення набувають пошуки та використання прісних підземних вод для потреб населення. Починаючи з 1960-х років, проблемам вразливості та захищеності підземних вод від антропогенних забруднювачів (важких металів, пестицидів, радіонуклідів) приділяється особлива увага.

Екологічні проблеми Донбасу:

- 1) затоплені шахти, просідання землі, радіація;
- 2) забруднення питної водопровідної води;
- 3) забруднення атмосфери;
- 4) знищення земельних ресурсів (деградація чорноземів);
- 5) забруднення водних ресурсів (поверхневі, підземні води);
- 6) дефіцит питної води;
- 7) вплив гірничовидобувної промисловості на довкілля;
- 8) нафтохімічне забруднення довкілля (підземні води, ґрунт);
- 9) вплив сільського господарства на якість підземних вод;
- 10) екоцид внаслідок Російсько-Української війни 2014-2024 років (знищення інфраструктури регіону, знищення заповідних територій, лісів, мінування сільськогосподарських угідь та інше).

В результаті війни на Донбасі неконтрольованими залишилися близько 4500 потенційно небезпечних промислових об'єктів. З 2014 по 2017 рік на підприємствах регіону зафіксували понад 500 випадків порушень та аварійних ситуацій, частина яких пов'язана з небезпекою для людей та навколишнього середовища [5].

Під час боїв неодноразово ушкоджувалися системи водовідведення в шахтах, підтоплення яких призводить до забруднення підземних та поверхневих вод залізом, хлоридами, сульфатами, іншими мінеральними солями та важкими металами. За словами екологів, війна пошкодила всі без винятку компоненти навколишнього середовища. Забруднено повітря, вода, пошкоджено значні площі землі, знищено рослини, зокрема на заповідних територіях. Заміновано близько 30% території України. Велику шкоду природі завдають пожежі, кількість яких збільшилась.

**Екологічна криза Донбасу: затоплення шахт, водні ресурси, просідання землі, радіація.** Зараз на Донбасі близько 200 промислових об'єктів несуть величезну екологічну загрозу. Якщо за них не взятися, це призведе до катастрофи транскордонного масштабу. Про це заявляв експерт України з питань тимчасово окупованих територій та внутрішньо переміщених осіб Вадим Черниш. «До списку потенційно небезпечних у 2018 р. потрапило 176 об'єктів. З них 132 – у Донецькій області (підконтрольна територія – 49, непідконтрольна – 83) і 44 об'єкти – у Луганській області (підконтрольна – 27, непідконтрольна – 17)» – повідомляють у МінТОТ [1, 6].

Найбільша проблема окупованих територій – затоплення шахт. Нині можна нарахувати 26 підприємств, що наразі розграбовані та поступово



заповнюються водою. У МінТОТ повідомляли, що у 2016 р. російська окупаційна влада з незрозумілих причин припинила відкачування води з-під землі. Як наслідок, почав просідати ґрунт на поверхні. Якщо взагалі не відкачувати воду, то ґрунт просідатиме і надалі, а це призведе до руйнації поверхні. У першу чергу під загрозою опиняться найближчі населені пункти. «На території Донецька ми у середньому фіксуємо просідання ґрунтів на 20-25 сантиметрів. Ми це бачимо завдяки супутниковому моніторингу. І це означає, що фактично провалюється поверхня міста» – зазначав експерт з питань тимчасово окупованих територій та внутрішньо переміщених осіб Вадим Черниш.

Зафіксовано й інші значні просідання ґрунту:

- 1) неподалік від шахт у Київському районі (Донецьк) – 53 см;
- 2) у Калінінському районі (Донецьк) – 69 см;
- 3) у Петровському районі (Донецьк) – до 92 см;
- 4) поблизу шахти «Щегловська» (Макіївка) – 52 см;
- 5) Гірницький район (Макіївка) – 63 см.

Крім зсуву землі, експерти побоюються, що з часом вода може вийти з шахт на поверхню та затопити навколишні території. І хоча міжнародні експерти неодноразово намагалися обстежити затоплені підземелля, бойовики постійно блокували доступ до них. У міністерстві вважають, що через просідання землі під загрозою перебувають 25 тисяч мирних жителів.

«Південно-Донбаський водогін» та канал «Сіверський Донець – Донбас» забезпечують питною водою громадян по обидва боки від лінії зіткнення – Маріуполь, Донецьк, Горлівка, Макіївка, Єнакієве, Авдіївка, Торецьк, Волноваха (3,5 млн осіб). «Через бойові дії канал та водогін – несправні: пошкоджені гідроізоляція русла каналу та герметичність самого водогону. У подальшому це зможе призвести до розвитку небезпечних геологічних процесів, таких як заболочування місцевості, зсуви, просідання поверхні, підйом рівня ґрунтових вод та погіршення якості води», – йдеться у дослідженні Державної екологічної академії.

Зараз роботу цих об'єктів забезпечують 20 фільтрувальних станцій і більшість з них розташована поблизу зони бойових дій, найближча територія всипана нерозірваними снарядами. У Міністерстві вважають, що через постійні обстріли на цих об'єктах можуть пошкодитись ємності з хлором, що призведе до викиду хімікатів в атмосферу та великої кількості жертв. Можлива зона ураження 30 квадратних кілометрів, хімічні отруєння з можливими летальними наслідками (залежно від напрямку вітру) можуть отримати 90 тис. осіб. Без працюючих фільтрувальних станцій громадяни, які проживають у регіоні залишаться без питної води. Це призведе до катастрофічної гуманітарної та санітарно-епідеміологічної ситуації.

Особливо непокоїть екологів шахта «Юний комунар» (Юнком, місто Бунге). Тут за радянських часів, у 1979 році, на глибині близько 900 метрів пролунав ядерний вибух. Так гірники намагалися зменшити ризик витоку метану у шахту. Нині під землею існує порожнина, де і стався цей вибух. Якщо вона буде затоплена, радіоактивні елементи потраплять у річки та водойми. За словами експерта з питань тимчасово окупованих територій та внутрішньо переміщених осіб Вадима Черниша, всі ці радіоактивні елементи можуть потрапити в Азовське море, рухаючись на південь по річках Булавин, Кримка та Міус.

«25 квітня 2018 року Кабмін додатково виділив для запобігання техногенно-екологічній катастрофі на Донбасі 131 мільйон гривень. Гірникам вдалося встановити спеціальне обладнання для відкачування підземних вод. Але наданих коштів, звісно, не вистачає. Зараз нам допомагає Світовий банк. Німецькі фахівці також можуть долучитися до фінансування вирішення проблем екології Донбасу», – заявляв ексміністр. Основна проблема – отримати доступ до небезпечних об'єктів [1, 6].

## Методи і результати

Розглянемо проблему впливу сільського господарства на якість природних вод Донбаського регіону [3].

Нами досліджувалися (1998 р.) питні та мінеральні води, поверхневі води озер Ріпне та Сліпне, лікувальні грязі (пелоїди) курорту м. Слов'янськ Донецької області з метою визначення вмісту хлорорганічних (ХОП), фосфорорганічних (ФОП), фторвмісних пестицидів (ФП), піретроїдів.

Аналітичні роботи виконані газохроматографічним методом. Встановлено наявність пестицидів похідних хлор-, фосфорорганічних, фторвмісних сполук та піретроїдів у всіх досліджених об'єктах навколишнього середовища. В районі курорту м. Слов'янськ Донецької області вміст пестицидів наступний: у *мінеральних водах* скв. 36 - 05, скв. 33 - 37 ХОП: сума ДДТ міститься у кількості  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>, сума ГХЦГ  $10^{-6}$ - $10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>, ФОП: метафос, фозалон, актеллік –  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  мг/дм<sup>3</sup>, ФП: трефлан  $10^{-9}$ - $10^{-8}$  мг/дм<sup>3</sup>.

У *лікувальних грязях озера Ріпне* ХОП: сума ДДТ –  $10^{-5}$ - $10^{-3}$  мг/кг, сума ГХЦГ –  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  мг/кг, ФОП: метафос, фозалон, актеллік  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  мг/кг, ФП: трефлан  $10^{-7}$ - $10^{-5}$  мг/кг.

У *воді озера Сліпне* ХОП: сума ДДТ  $10^{-7}$ - $10^{-5}$  мг/л, ФОП: метафос, актеллік –  $10^{-6}$ - $10^{-4}$  мг/дм<sup>3</sup>, ПФ: трефлан –  $10^{-8}$  мг/дм<sup>3</sup>.

За аналізом отриманих даних пріоритетними забруднювачами є метаболіти ДДТ (п,п'-ДДЕ, п,п'-ДДТ, ізомери ГХЦГ). Наявність цих сполук у мінеральних водах спричинена забрудненням водовмісних порід. Присутність ГХЦГ у підземних водах свідчить про його вертикальну міграцію, очевидно, це пов'язане з поганою цементацією затрубного простору свердловин. Наявність хлорорганічних пестицидів у лікувальних грязях пов'язана з їх перенесенням у природних умовах водним та еоловим шляхом. До пріоритетних також можуть бути віднесені фосфорорганічні препарати, з фторвмісних – трефлан. Виявлені в окремих випадках такі пестициди, як піретроїди (децис, цимбуш), свідчать про погану захищеність підземних вод та інтенсивний водообмін.

Одночасно в пробі є від 9 до 13 найменувань пестицидів. Наявність пестицидів у мінеральних водах та лікувальних грязях, як в одній з віддалених ланок трофічного ланцюга, становить особливу небезпеку, оскільки свідчить про неблагополучну екологічну ситуацію в регіоні, а також не виключає можливість негативного впливу цих сполук на ослаблені групи населення (хворі, діти).

Нині стійкі хлорорганічні пестициди накопичилися у підземній геосистемі, зокрема й у гідромінеральних ресурсах. Існує також можливість забруднення пестицидами території округів санітарної охорони через їхню слабку захищеність.

Відзначено перевищення ГДК за сумою ДДТ у 2,7 раза в мулах західної частини оз. Ріпне, метафосом в лікувальних експлуатаційних грязях і мулах західної, східної частини оз. Ріпне в 8,5, 18, 7,5 разів відповідно, а по фазолону в лікувальних експлуатаційних грязях в 76 разів. В інших випадках виявлені пестициди знаходяться на рівні нижче за гранично допустиму концентрацію. У мінеральних водах, а також у воді оз. Сліпне встановлено перевищення ГДК лише за фосфорорганічним пестицидом актеллік, вміст якого у воді не допускається. В інших випадках також, як і в лікувальних грязях, не відмічено перевищення ГДК. Викладене порушує питання про необхідність проведення систематичних спостережень за вмістом нових пестицидів у мінеральних водах та лікувальних грязях курортів Донбаського регіону.

За нашими розрахунками на 2024 рік концентрація ДДТ у об'єктах навколишнього середовища Донбаського регіону зменшилась на 2-3 порядки в залежності від природних умов. В теперішній час (листопад 2024 р.) м. Слов'янськ знаходиться на підконтрольній Україні території. Під час надзвичайних ситуацій, в умовах, коли традиційна інфраструктура, водогони та дамби страждають від руйнувань, саме підземні води стають незамінним ресурсом, важливість якого важко переоцінити.

**Якість підземних вод Донецької області.** З 15 січня 2023 року по 1 квітня 2024 року було проведено аналіз 750 проб підземних вод по території України [2]. Середні значення показників якості підземних вод, відібраних у 2023-2024 роках в Донецькій області, наведені в таблиці 1 [2].

Таблиця 1. Середні значення показників якості підземних вод, відібраних у 2023-2024 роках в Донецькій області

Нормативне значення показника з ДСан ПІН 2.2.4-171-10	показника згідно	Донецька область
Запах, бали	≤ 2	0.00
Мутність, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 0.58	4.2
Кольоровість, град	≤ 20	38
Твердість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>	≤ 7	9.9
Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 1000	927
Залізо загальне, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 0.2	14.0
Нітрати, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 50	7
Хлориди, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 250	212
Марганець мг/дм <sup>3</sup>	≤ 0.05	1.10
Перманганатна окислюваність, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 5	9.2
Фториди, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 1.5	0.5

Показники мутність, кольоровість, твердість загальна, залізо загальне, перманганатна окислюваність перевищують нормативне значення показника згідно з ДСанПІН 2.2.4-171-10.

Інші показники не перевищують нормативне значення показника згідно з ДСанПІН 2.2.4-171-10.

У 2016 році групи науковців з обох боків лінії зіткнення досліджували резервні джерела питної води в Донбаському регіоні. Більш ніж 90% з них виявилися не придатними для використання. У Донецьку відстежують зміни якості води по всій довжині каналу «Сіверський Донець – Донбас». Величезна різниця між Донецькою і Луганською областями в тому, що Донецьк та

околиці не без проблем отримують питну воду каналом із Харківської області, а Луганськ із підземних водозаборів, які перебувають під очевидною загрозою забруднення шахтовими водами з бездумно та безсистемно затоплених шахт. Підйом шахтових вод до поверхні неминуче забруднить підземні джерела прісної води для Луганська. Катастрофа з питною водою для міста й околиць – питання найближчого майбутнього. У Торезьк, на думку гідрогеологів, неминуче рано чи пізно прийде вода з радіацією, коли буде зруйнована радіоактивна капсула шахти «Юнком».

Вступивши в асоціацію з Європейським Союзом, Україна ухвалила і норми Європейської водної директиви, згідно з якою якість питної води має аналізуватися за 45 показниками. На європейські гроші вже в роки війни на Донбасі організували пілотний проєкт із запровадження норм ЄС, і та сама державна лабораторія Басейнового управління Сіверського Дінця стала найкращою в Україні за обладнанням і якістю реактивів. Але навіть вона зараз аналізує 17 із 45 показників, можливості лабораторій на невідконтрольній території набагато скромніші.

Перші результати екологічної експедиції на Донбасі вказали на необхідність моніторингу радіоактивного забруднення внаслідок серйозного руйнування техногенного середовища. Відомий український гідрогеолог Євген Яковлев зазначав, що у 2018 р. накопичена під землею вода прямувала донизу з неймовірними обсягами – приблизно 30 тис. м<sup>3</sup> на годину, затоплюючи всі підземні порожнини і копальні [7].

У 2014 р. найбільш забрудненим було повітря в містах Луганськ, Алчевськ, Лисичанськ, Краснодонському районі. У Департаменті екології зазначили: підприємства області шкодять водним ресурсам. Вода забруднювалася переважно через промислові і побутові скиди. Також були ризики в екологічній сфері через накопичення відходів. Серед екологічних проблем Луганської області варто відзначити і копанки. Крім того, що робота на них небезпечна для життя, копанки були загрозою для заповідних територій.

До війни у Луганській області діяли заповідник «Стрільцівський степ», Ландшафтний заповідник «Боково-Платово», Луганський природний заповідник, Станично-Луганський заповідник. На Донеччині до війни працювали чотири відділення Українського степового заповідника Національної академії наук України: Хомутовський степ, Кам'яні могили, Крейдова флора, Кальміуський. За словами Д.Б. Тимчука (керівника групи «Інформаційний спротив»), у жовтні 2018 року так звана «влада ДНР» звільнила всіх працівників, які обслуговували і експлуатували насосні установки, а на початку листопада було зупинене відкачування води з гірських виробок шахти «2-біс» і «Нова». Експерти заявили, що затоплення шахти, де видобували ртуть, може призвести до просідання ґрунту під річищем каналу «Сіверський Донець – Донбас» і руйнування водогону [8].

На Донеччині близько 40 млн тонн токсичних відходів, які зокрема містять арсен, свинець, ртуть, кадмій, нікель, нафтопродукти, відходи гальванічних та коксохімічних виробництв та інші. Загалом на Донеччині накопичено близько 4 млрд промислових та 400 млн м<sup>3</sup> побутових відходів (25% від усіх по Україні) [9].

## Висновки

Реальний початок розв'язання екологічних проблем Донбасу і всіх захоплених Росією українських територій загалом впирається в одне-єдине питання – деокупацію [4]. Лише після звільнення всієї території Україна і весь цивілізований світ зможуть нарешті оцінити реальний стан екології. Зокрема, відповісти, як покращити водопостачання, реанімувати понівечені війною ліси, поля, ріки, скільки це зрештою коштуватиме, і загалом зрозуміти масштаби втрат, яких зазнала наша флора і фауна через російську агресію, зокрема, скільки червонокнижних видів тварин та рослин назавжди зникло на окупованих теренах, а скільки все ж вдалося врятувати.

## REFERENCES

1. Golub, A. (04.06.2018). Newspaper "Ukrainian Interest" (in Ukrainian). [Голуб А. Газета «Український інтерес» 04.06.2018].
2. Driker, Y. (2024). Underground waters of Ukraine: an important resource in wartime. J. Water and water purification technologies, 1-2 (107-108), 60-63 (in Ukrainian). [Дрікер Ю. (2024). Підземні води України: важливий ресурс в умовах війни. Ж. Вода і водоочисні технології, № 1-2 (107-108), 60-63].
3. Osokina, N.P. (2019). Content of residual quantities of pesticides in groundwater and other objects of the natural environment of individual regions of Ukraine. K.: Publisher Kravchenko Ya.O. [Осокіна Н.П. (2019). Содержание остаточных количеств пестицидов в подземных водах и других объектах природной среды отдельных регионов Украины. К.: Издатель Кравченко Я.О.].
4. Retrieved from <https://dif.org.ua/article/totalniy-voennyi-ekotsid-shcho-rosiya-zrobila-z-ekologiyu-donbasu>
5. Retrieved from <https://nv.ua/opinion/ukraina-ekologiya-kakovy-samy-bolshie-ekologicheskie-problemy-strany-novosti-ukrainy-50178582.html>
6. Retrieved from <http://uain.press/articles/ekologichna-sytuatsiya-na-donbasi-838351>
7. Retrieved from <http://hromadske.ua/posts/gibridni-ekologi-yak-ekokatastrofa-na-donbasi-zvela-razom-uchenih-iz-kiyeva>
8. Retrieved from <https://hromadske.radio/publications/ekologichna-katastrofa-chomu-polovyna-terytoriyi-donbasu-mozhe-staty-neprydatnoyu-dlya-zhyttya>
9. Retrieved from [https://uk.wikipedia.org/wiki/Екологія\\_Донеччини](https://uk.wikipedia.org/wiki/Екологія_Донеччини)

*Стаття надійшла до редакції 09.10.2024 і прийнята до друку після рецензування 09.12.2024*

*The article was received 09.10.2024 and was accepted after revision 09.12.2024*

### **Осокіна Ніна Павлівна**

кандидат геолого-мінералогічних наук, Інститут геологічних наук НАН України

**Адреса робоча:** вул. О. Гончара, 55 б, 01601 Київ-54, Україна

**e-mail:** N.Osokina@gmail.com

УДК 502.573

**Veronika Prykhodko**, PhD (Geography), Associate Professor, Associate Professor of Ecology and Environmental Protection Department

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

**Tamerlan Safranov**, D.Sc. (Geology), Professor, Professor of Ecology and Environmental Protection Department

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0928-5121> **e-mail:** safranov@ukr.net

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

## **STUDY OF SPATIAL AND TEMPORAL FEATURES OF MUNICIPAL SOLID WASTE GENERATION IN THE REGIONS OF UKRAINE**

***Abstract.** The article is devoted to the topical issue of municipal solid waste generation in the regions of Ukraine as an important prerequisite for the formation of an effective waste management system. The purpose of the study is to identify the spatial and temporal features of municipal solid waste generation in the regions of Ukraine (as of 2021) based on certain indicators. The methods of statistical analysis of data on municipal solid waste collection, standards for the provision of solid waste removal services and other databases by regions of Ukraine for different years of the period 2010-2023 were used in the research. The main results of the study are to substantiate the indicator role of specific waste generation and to determine the spatial and temporal features of the quantitative indicators distribution of municipal solid waste generation. In particular, it is determined that there is a certain relationship between GDP and the amount of waste generation, as well as of the area and number of landfills. Waste generation is gradually increasing: over the period 2011-2021, the weight of collected solid waste increased by 9.8% and the volume – by 5.6%. In addition, the standards for the provision of solid waste collection services in the regional centers of Ukraine increased by 12% in average. It was determined that the waste has become somewhat denser, as evidenced by a decrease in the volume but an increase in the weight of collected solid waste during 2018-2021. The collection of solid waste was 1,244 m<sup>3</sup>/person or 254 kg/person per year (or 0,696 kg/person per day). Taking into account the level of coverage of the population with centralized waste collection services, the actual waste generation is at least by 20% higher. Under martial law, the amount of municipal solid waste was expected to decrease: the volume of collected waste fell by 13.7% and the weight – by 10.7% (2023). It is promising to further analyze the municipal solid waste generation by averaging and interpretation of data. The scientific and practical significance of the results lies in the substantiated analysis of data and synthesis of information on the main features of municipal solid waste generation in Ukraine.*

***Keywords:** municipal solid waste, indicator, service provision standards, waste generation.*

В.Ю. Приходько, Т.А. Сафранов

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ УТВОРЕННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ В РЕГІОНАХ УКРАЇНИ

**Анотація.** Стаття присвячена актуальній тематиці утворення твердих побутових відходів в регіонах України як важливої передумови формування ефективної системи управління відходами. Мета дослідження – виявити просторово-часові особливості утворення твердих побутових відходів в регіонах України (станом на 2021 р.) на основі визначених показників-індикаторів. В роботі використані методи статистичного аналізу даних щодо збирання побутових відходів, норм надання послуг з вивезення твердих побутових відходів та інших показників по регіонах України за різні роки періоду 2010-2023 рр. Основні результати дослідження полягають в обґрунтуванні індикаторної ролі питомого відходоутворення та визначенні просторово-часових особливостей розподілу кількісних показників утворення твердих побутових відходів. Зокрема, визначено, що існує певний зв'язок між ВВП та кількістю утворених відходів, а також площею та кількістю місць захоронення. Утворення відходів поступово збільшується: за період 2011-2021 рр. маса зібраних ТПВ збільшилася на 9,8%, а об'єм – на 5,6%. Крім того, в середньому, на 12% зросли норми надання послуг з вивезення ТПВ по обласних центрах України. Визначено, що відходи стали децю щільнішими, про свідчить зменшення обсягів, але збільшення маси зібраних ТПВ протягом 2018-2021 рр. Питоме збирання твердих побутових відходів склало 1,244 м<sup>3</sup>/люд або 254 кг/люд за рік (або 0,696 кг/люд за добу). З урахуванням рівня охоплення населення послугами з централізованого збирання відходів фактичне утворення відходів є вищим щонайменше на 20%. В умовах військового стану кількість побутових відходів очікувано зменшилася: об'єм зібраних відходів впав на 13,7%, а маса – на 10,7% (2023 р.). Перспективним є подальший аналіз ситуації з утворення твердих побутових відходів з усередненням та інтерпретацією даних. Наукове та практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтованому аналізі даних та синтезі інформації про основні особливості генерації твердих побутових відходів в Україні.

**Ключові слова:** тверді побутові відходи, індикатор, норми надання послуг, відходоутворення.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.69-81>

### Вступ

Життя сучасного суспільства неможливо уявити без утворення відходів, але кількість відходів може бути різною. Утворення ТПВ – це генерація відходів в процесі життєдіяльності людини в рамках певної моделі стилю життя. Утворення визначається в абсолютних (масових або об'ємних) або відносних (на одну людину) одиницях.

Очевидно, що кількість утворених відходів залежить від кількості населення, що їх генерує. Зростання кількості утворених відходів також визначається зростанням ВВП країни [1]. У доповіді Waste Management Outlook (2024) [2] зазначено, що у сучасних умовах зміни статків країни, стилю

життя та споживання зростає кількість ТПВ. За розрахунками, кількість утворених ТПВ за період 2020-2050 зросте у 1,77 раза, причому 69% цього приросту зумовлено зростанням ВВП, а 31% – зростанням кількості населення. Рівень добробуту країни визначає й інші фактори впливу на відходоутворення: модель споживання, урбанізованість, розвиток торгівлі і логістики, екологічна свідомість, стан сфери управління відходами тощо. Також необхідно зазначити вплив природних умов – клімату та території – на формування кількості та морфологічного складу ТПВ [3]. На сьогодні є очевидним, що обсяги відходів лінійно зростають із ростом кількості населення та добробуту країни, зумовлюючи посилення екологічних наслідків розміщення відходів у довкіллі: забруднення усіх природних складових → зміна природних умов сталого функціонування екосистем → зменшення біорізноманіття та сталості глобальної екосистеми (природної системи). Все це спонукає світову спільноту до пошуку рішень щодо обмеження впливу ТПВ на довкілля через зменшення обсягів та технологій остаточного видалення. В країнах ЄС це знайшло відображення у «Плані дій ЄС щодо циркулярної економіки» [4], який був прийнятий 11 березня 2020 року. Метою цього плану є скорочення споживання в ЄС та подвоєння повторного використання ресурсів у найближчі десятиліття, але не за рахунок економічного спаду. Щоправда, впровадження широких ініціатив з повторного використання відходів та їх ресурсного потенціалу не показало очікуваних значних результатів. Наприклад, у 2012 р. для країн-членів ОЕСР з найбільшим питомим утворенням ТПВ прогнозувалося незначне зниження цього показника з 2,2 до 2,1 кг/люд. за добу на період 2010-2025 рр., а вже в наступній доповіді для країн з найвищим рівнем соціально-економічного розвитку зроблений прогноз щодо збільшення питомого відходоутворення на 18% з 1,58 до 1,87 кг/люд за добу з 2016 по 2050 рр. [2]. Щоправда, це найнижчий темп росту питомого відходоутворення серед інших груп країн за рівнем доходів. Так, наприклад, для інших країн прогнозується зростання питомого відходоутворення на рівні 51-72% з 2020 по 2050 рр.

За даними статистичного відділу ООН, у 2019 р. кількість зібраних ТПВ оцінювалася як 199,51 кг/люд. (що становить 0,55 кг/люд. за добу), в т.ч. по Києву – 484 кг/люд. Відповідно до класифікації країн за рівнем соціально-економічного розвитку, що є основою для класифікації і прогнозування утворення відходів, Україну віднесено до країн з низьким рівнем соціально-економічного розвитку із прогнозованим добовим відходоутворенням на рівні 0,63 кг/люд у 2030 р. та 0,79 кг/люд у 2050 р. [2]; або 0,57 та 0,81 кг/люд за даними [1].

Отже, оцінка утворення ТПВ є необхідною передумовою розробки систем управління відходами на національному і регіональному рівнях. Дослідження просторово-часових особливостей утворення ТПВ є важливим етапом комплексної оцінки стану сфери управління відходами та прогнозування ситуації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Кількість утворених ТПВ, аналіз змін і прогноз є предметом офіційних доповідей, наприклад, «Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні (за різні роки)»[5], а також Національної доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні [6], статистичних збірників «Довкілля України» [7] тощо. В роботі автора [8] представлено дослідження регіональних особливостей захоронення



ТПВ станом на 2018 р., а також обґрунтовано індикаторну роль окремих показників, пов'язаних із утворенням відходів. Використання даних про утворення ТПВ у кластерному аналізі представлено в статті О.А. Бездухова [9], а також в статті автора [10]. Обсяги утворення ТПВ є вихідною характеристикою у логістичних розробках [11] та розробці прогнозних моделей [12, 13].

**Мета даного дослідження** – виявити просторово-часові особливості утворення ТПВ в регіонах України (станом на 2021 р.) на основі визначених показників-індикаторів.

### Результати дослідження

**Визначення факторів, які впливають на кількісні параметри генерації ТПВ в Україні.** Як визначено попередньо в роботах [3, 11, 12], є певні фактори, що визначають кількість генерації ТПВ – структура житлового фонду, розвиток роздрібною торгівлі та громадського харчування, доходи населення, кліматичні особливості тощо, але визначальними є кількість населення та рівень добробуту.

Тому на основі даних про обсяги захоронених відходів, кількість та площу полігонів і звалищ (за окремі роки періоду 2000-2023 рр.) проаналізуємо залежність між валовим внутрішнім продуктом (ВВП) та означеними параметрами сфери поводження з ТПВ.

Так, залежність між обсягом ТПВ та ВВП представлена на рис. 1.

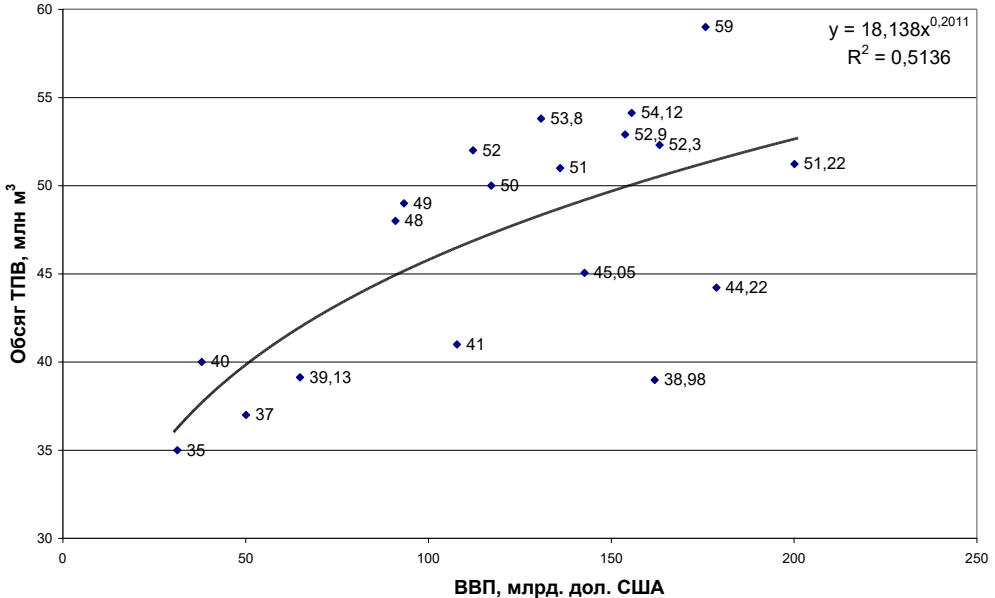


Рис. 1. Залежність між ВВП та утворенням ТПВ в Україні за 19 років (2000-2023 рр.)

В табл. 1 наведена оцінка взаємозв'язку між ВВП та окремими параметрами, що характеризують сферу ТПВ.

Таблиця 1. Коефіцієнти кореляції між ВВП та утворенням (захороненням) ТПВ

Кількість місць захоронення	Площа місць захоронення	Обсяг утворених ТПВ
0,811	0,675	0,655

Все це ще раз підтверджує тезу про те, що визначальним фактором формування кількості ТПВ є рівень соціально-економічного розвитку країни.

Отже, кількість утворених ТПВ є похідною величиною, що визначається споживанням, яке, в свою чергу, залежить від рівня статку населення та оцінюється через показник ВВП. Тому рівень відходоутворення є непрямим показником добробуту країни з одного боку, та, з іншого боку, впливу на довкілля. Така властивість надавати більш широку оцінку процесам вищого рівня притаманна індикаторам. В статті [8] для оцінки ситуації із захороненням ТПВ окремо виділено блок вихідних даних щодо утворення відходів. На основі цих даних визначаються відповідні індикатори, серед яких в даній статті розглядається питома утворення (збирання) ТПВ (м<sup>3</sup> або в т на 1 людину). Дотичним показником є частка захоронених відходів за поточний рік, яка характеризує поповнення місць захоронення ТПВ.

При розробці регіональних та місцевих планів з управління відходами серед показників, за якими оцінюється стан системи управління відходами, є абсолютні та питомі величини відходоутворення. До того ж, на основі цих показників розробляються критерії ефективності функціонування розробленої системи управління відходами.

**Аналіз даних про утворення ТПВ в регіонах України станом на 2021 рік.** На основі даних Міністерства розвитку громад та територій України [5] за 2021 рік охарактеризуємо просторово-часові особливості утворення ТПВ. На початку проаналізуємо вихідні дані (табл. 2).

Таблиця 2. Аналіз даних про утворення та захоронення ТПВ по регіонах України за 2021 рік

Значення показників	Обсяги збирання		Обсяги захоронення		Частка захоронених ТПВ
	м <sup>3</sup>	т	м <sup>3</sup>	т	обсяг/маса
Максимальне	10009043,87 (Київ та обл.)	1882609 (Київ та обл.)	6722513,14 (Київ та обл.)	2013599,65 (Київ та обл.)	114/136 (Запорізька обл.)
Мінімальне	637447,36 (Луганська обл.)	153695,652 (Кіровоградська обл.)	664746,18 (Луганська обл.)	167110 (Тернопільська обл.)	53/25 (Тернопільська обл.)
Національний рівень	51228036,8	10466369,87	47801109,01	10417649,7	93,3/99,5

Враховуючи чисельність населення України за 2021 р. (41 167 335 осіб), питома збирання ТПВ склало 1,244 м<sup>3</sup>/люд або 254 кг/люд за рік (або 0,696 кг/люд за добу). Рівень охоплення населення послугами з централізованого збирання відходів становить 78,6%, тому утворення відходів є вищим щонайменше на 20%.

Логічно, що найбільші обсяги збирання та захоронення характерні для однієї з найбільших за площею та найбільшою за населенням – Київської області (разом з м. Київ). За рахунок столиці утворюється 75% (за об'ємом) та 85% (за масою) від ТПВ регіону.

Найменші значення збирання та захоронення ТПВ за обсягом – для частини Луганської області, а за масою – для Кіровоградської та Тернопільської областей відповідно.

Частка захоронення ТПВ (табл. 2) – це співвідношення між кількістю зібраних та захоронених відходів за рік. На нашу думку, доцільно аналізувати співвідношення в одиницях маси, оскільки при транспортуванні ТПВ відбувається ущільнення відходів. Бачимо, що в окремих випадках цей показник перевищує 100% – Дніпропетровська, Донецька, Запорізька, Кіровоградська, Луганська, Полтавська, Черкаська і Чернігівська області. Це, скоріше, зумовлено недоліками у системі обліку відходів, аніж захороненням відходів за межами регіону утворення.

Для аналізу динаміки кількості ТПВ за період 2011-2021 рр. нами використані дані з двох джерел – статистичного щорічника «Довкілля України 2011» [7] (одиниці вимірювання – тонни) та з «Національної доповіді про стан навколишнього природного середовища у 2011 році» [6] (одиниці вимірювання – м<sup>3</sup>).

На рис. 2 представлена динаміка зміни кількості зібраних ТПВ за 10-річний період.

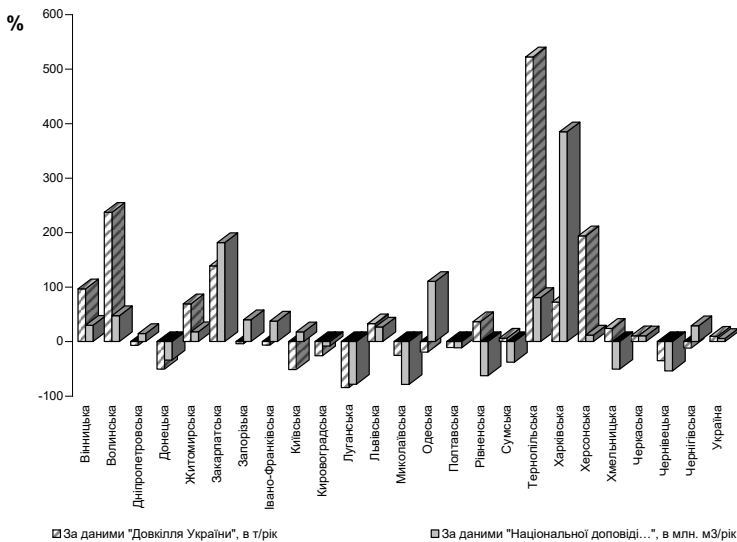


Рис. 2. Динаміка обсягів та маси зібраних ТПВ по регіонах України за 2011-2021 рр.

Розрахований за різними даними приріст обсягів та маси зібраних ТПВ за період 2011-2021 рр. показав, що, за винятком Дніпропетровської, Запорізької, Івано-Франківської, Київської, Одеської, Рівненської, Сумської, Хмельницької, Чернігівської областей, спостерігається взаємна відповідність отриманих результатів. За винятком Донецької, Луганської, Миколаївської та Чернівецької областей, спостерігається позитивна динаміка зміни маси та

обсягів зібраних відходів. В середньому по Україні маса зібраних ТПВ збільшилася на 9,8%, а об'єм – на 5,6%. Розрахований коефіцієнт кореляції між отриманими значеннями приросту обсягів утворення відходів за різними даними склав 0,66, що свідчить про певну узгодженість даних [13].

### Аналіз питомого утворення ТПВ в регіонах України станом на 2021 рік.

Питоме утворення ТПВ можна оцінити через показник норми надання послуг з вивезення відходів (управління відходами). Для аналізу норм надання послуг з вивезення ТПВ використані діючі на 2024 рік показники за різні роки (2018-2023), прийняті для 23 обласних центрів України (рис. 3). Середнє значення норми надання послуг з вивезення відходів склало 2,20 м<sup>3</sup>/люд. або 355 кг/люд. за рік. Як бачимо з рис. 3, в основному, значення норми відповідає середньому по обласних центрах України. Максимальне значення характерно для Одеси – 3,3 м<sup>3</sup>/люд., мінімальне – 1,558 м<sup>3</sup>/люд. для Сум. Що стосується норми надання послуг з вивезення ТПВ в одиницях маси, то середнє значення склало 355,5 кг/люд.

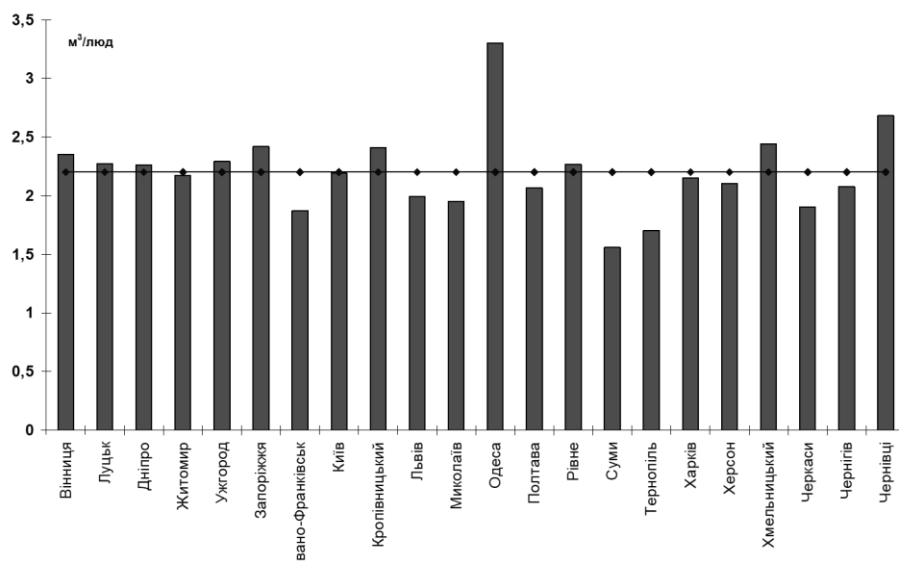


Рис. 3. Норми надання послуг з вивезення ТПВ для обласних центрів України (2018-2023 рр.)

Очевидно, що норма надання послуг з вивезення ТПВ (норма утворення ТПВ) є одним з ключових параметрів, що має враховуватися при аналізі ситуації з ТПВ на регіональному рівні. Як бачимо, є певні відмінності від середнього значення, наприклад, Чернігів (мінімальне значення) та Одеса (максимальне значення). Коефіцієнт варіації норми надання послуг з вивезення ТПВ склав 16%, що дозволяє зробити висновок щодо однорідності вибірки даних.

Якщо порівняти значення норм надання послуг з вивезення ТПВ за період до та після 2018 р., можна зробити висновок про збільшення значень цього показника (рис. 4). Так, середнє значення норми надання послуг з вивезення ТПВ до 2018 р. склало 1,93 м<sup>3</sup>/люд., що на 12% нижче значення за сучасний період.

Показники збирання ТПВ та утворення ТПВ фактично тотожні, але, враховуючи середнє охоплення населення послугами з централізованого збирання ТПВ на рівні 78,6%, можна припустити, що фактичне утворення відходів є більшим принаймні на 20%. Але для порівняльного аналізу допустимо ототожнювати показники збирання та утворення ТПВ.

Отже, зазначимо, що питоме утворення ТПВ доцільно оцінювати за фактичними обсягами зібраних відходів (наприклад, дані [5, 14]).

Питоме збирання ТПВ розраховувалося на основі даних про обсяг та масу зібраних ТПВ за 2018 та 2021 рр., а також кількості населення по регіонах України (рис. 5, 6).

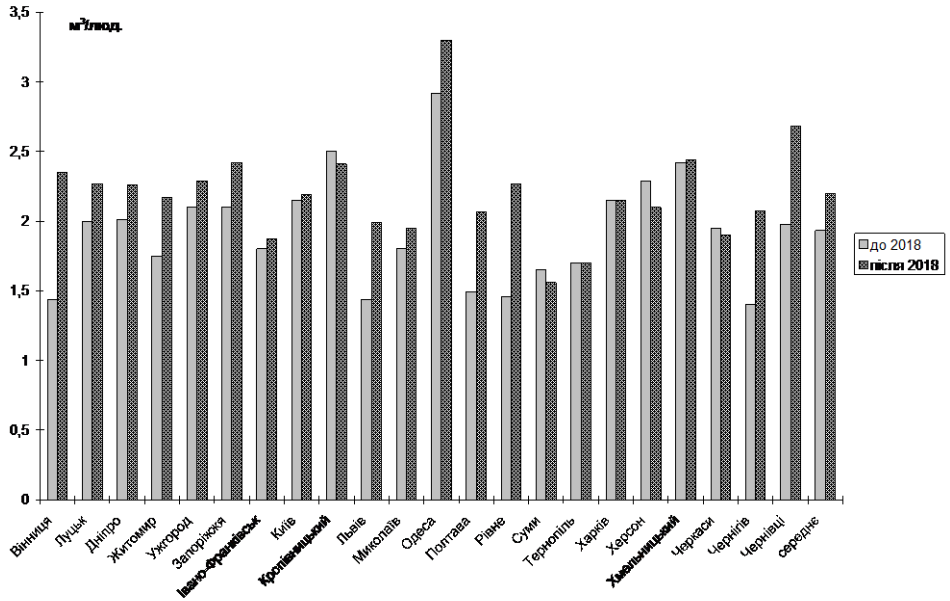


Рис. 4. Норми надання послуг з вивезення ТПВ для обласних центрів України

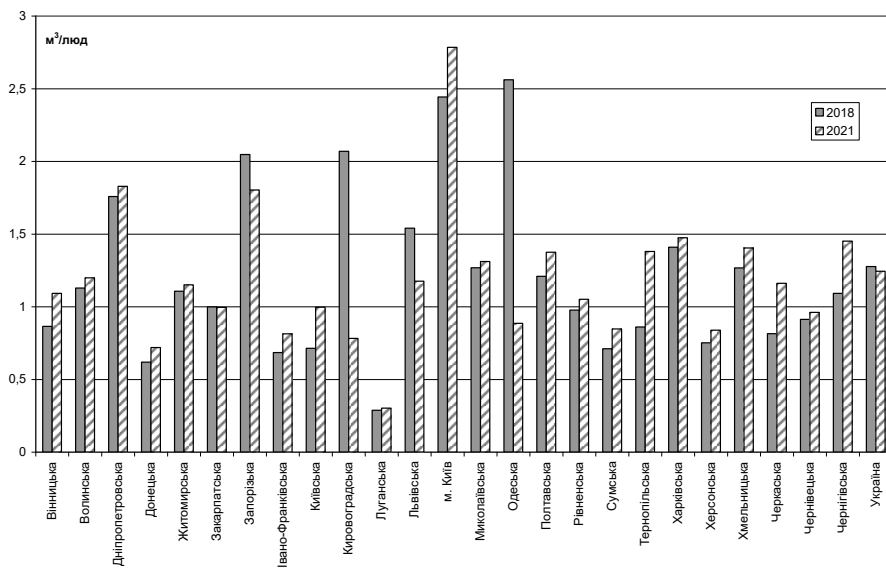


Рис. 5. Питоме збирання ТПВ за 2018 та 2021 рр. (за обсягом)

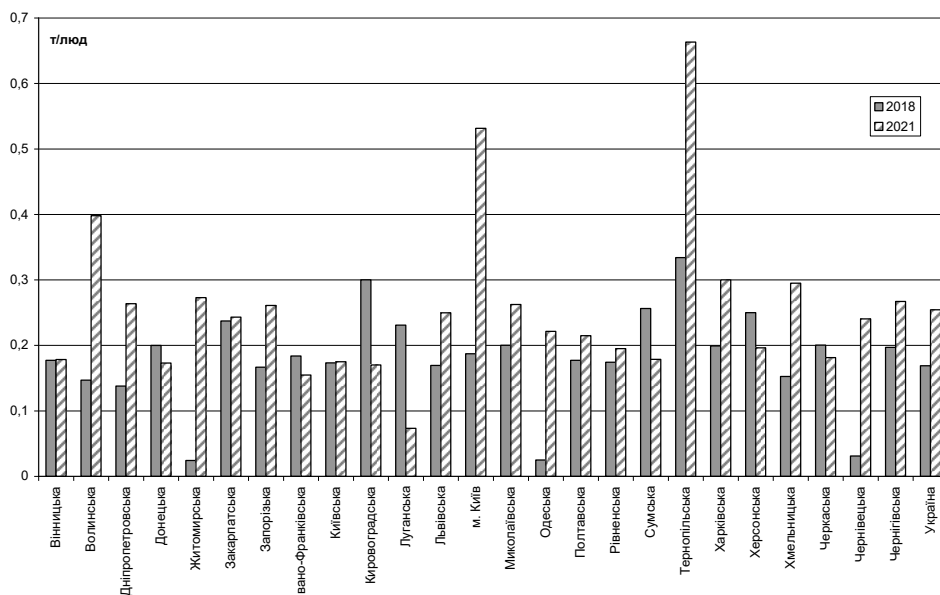


Рис. 6. Питоме збирання ТПВ за 2018 та 2021 рр. (за масою)

В середньому в Україні на 1 людину припадає 1,24 м<sup>3</sup> або 0,25 т зібраних ТПВ. Найбільший обсяг зібраних відходів характерний для Дніпропетровської області – 1,83 м<sup>3</sup>/люд., найменший – для Луганської області – 0,30 м<sup>3</sup>/люд. Щодо питомого збирання ТПВ в одиницях маси, то найбільше зібраних відходів у Тернопільській області – 0,66 т/люд., найменше – у Луганській області – 0,07 т/люд.

Аналіз темпів росту питомого збирання відходів по регіонах України показав, здебільшого, зростання показника як в одиницях об'єму (за винятком 5 областей), так і в одиницях маси (за винятком 7 областей). Так, середнє зростання питомого збирання відходів склало 117% (за об'ємом) та 160% за масою. Розрахунок показників динаміки збирання ТПВ за 2018-2021 рр. виявив певні недоліки у вихідних даних. Наприклад, для Житомирської області темп росту питомого збирання за масою склав 1131%, для Одеської – 885% (за об'ємом, навпаки, падіння на 65%), для Чернівецької – 772%, що свідчить про помилки у вихідних даних, наведених у звіті [5].

Якщо проаналізувати зміни в обсягах і масі зібраних ТПВ за період 2018-2021 рр., можна сказати, що обсяги зменшилися на 4,38%, проте маса збільшилася на 3,52%, тобто зібрані у 2021 р. відходи стали щільнішими. Розраховані темпи приросту питомого відходоутворення за період 2018-2021 рр. показали, що питомий обсяг впав на 2,48%, проте питома маса зросла на 50,66%, що також свідчить про збільшення щільності ТПВ.

Розрахована середня щільність захованих відходів по регіонах України склала 0,18 т/м<sup>3</sup> (у 2018 р.) та 0,21 т/м<sup>3</sup> (у 2021 р.).

Значення коефіцієнта кореляції між питомим збиранням у різних одиницях вимірювання склало 0,66.

**Збирання ТПВ в умовах військового стану.** Динаміка зміни кількості зібраних ТПВ за період 2021-2023 рр. представлена на рис. 7.

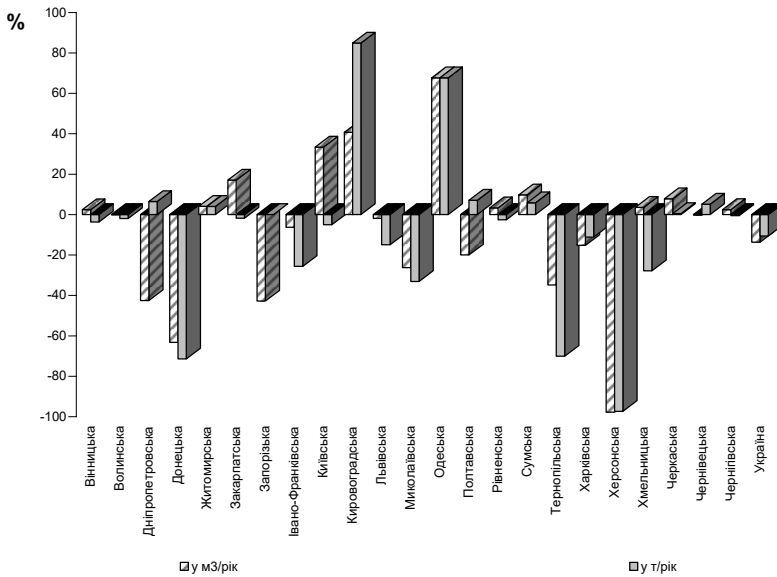


Рис. 7. Динаміка змін обсягів та маси зібраних ТПВ в умовах повномасштабного вторгнення РФ в Україну в 2023 р.

Дослідження змін у кількості зібраних ТПВ з початком повномасштабного вторгнення показало, що найбільш інтенсивний спад у кількості зібраних ТПВ характерний для Херсонської (-97%), Донецької (-63%) областей, території яких значною мірою окуповано або ведуться активні бойові дії. Суттєво знизилася кількість зібраних відходів у Дніпропетровській (-42% за об'ємом) та Тернопільській (-35 та -70%) областях. Натомість зросла кількість зібраних відходів в Одеській (на 67,7%), Кіровоградській (40,6 та 84,8%), Київській (33% за об'ємом) областях. В середньому в Україні об'єм зібраних відходів впав на 13,7%, а маса – на 10,7%. В загальному обсязі зібраних за 2023 р. ТПВ не враховані дані з Луганської області, понад 90% території якої окуповано.

### Висновки та перспективи подальших досліджень

Утворення відходів, зокрема й побутових, є важливим показником при розробці системи індикаторів для оцінки впливу на довкілля та формування системи управління відходами на різних рівнях – від національного до місцевого. Зокрема, відходоутворення – важливий параметр при розробці регіональних та місцевих планів управління відходами. Показано, що питоме відходоутворення відіграє важливу індикаторну роль серед інших показників, пов'язаних із утворенням та управлінням ТПВ. Наукове та практичне значення отриманих результатів полягає у всебічному аналізі даних з утворення ТПВ та синтезі нової інформації про зміни в генерації відходів.

Основним фактором, який визначає кількісні параметри утворення ТПВ, є рівень соціально-економічного розвитку країни: зі збільшенням добробуту зростає кількість утворених відходів. Країни з найвищим рівнем доходів характеризуються найбільшим питомих відходоутворенням, але значно

меншим прогнозованим ростом цього показника. Для України показано, що є певний зв'язок між ВВП та утворенням відходів, а також площею та кількістю місць захоронення.

У 2021 р. в Україні збиралося 1,244 м<sup>3</sup>/люди або 254 кг/люди, але утворювалося відходів щонайменше на 20% більше.

Аналіз первинної інформації щодо обсягів зібраних ТПВ по регіонах України показав певні недоліки, що ускладнюють науковий аналіз даних та впливають на отримані результати.

Відбувається збільшення утворення відходів. Так, за період 2011-2021 рр. маса зібраних ТПВ збільшилася на 9,8%, а об'єм – на 5,6%. Також зросли норми надання послуг з вивезення ТПВ по обласних центрах України – на 12%.

З часом ТПВ стали дещо щільнішими. Про це свідчить, зокрема, зменшення обсягів, але збільшення маси зібраних ТПВ протягом 2018-2021 рр.

Значні зміни відбулися із початком повномасштабного вторгнення РФ в Україну в 2022 р. По даним на 2023 р., об'єм зібраних відходів впав на 13,7%, а маса – на 10,7%. Найбільш інтенсивний спад, очікувано, спостерігався у східних областях. Проте дані зміни вимагають подальшого вивчення та порівняння з базовим 2021 р. Безумовно, в перспективі необхідна більш детальна оцінка змін, що відбулися в системі управління та поводження з ТПВ під впливом військових дій.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Global Waste Management Outlook / by David C. Wilson. UNEP, 2015. 332 p.
2. Kaza Silpa, Yao Lisa C., Bhada-Tata Perinaz, Van Woerden Frank. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: World Bank, 2018. 271 p. doi:10.1596/978-1-4648
3. Collection of Municipal Solid waste in Developing Countries. UN-Habitat, 2010. 200 p.
4. Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614>
5. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2021 рік. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zkhk/terretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vidhodamy-v-ukrayini-za-2021-rik/>
6. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні в 2011 році. К. : Міністерство екології та природних ресурсів України, LAT & K. 2012. 258 с. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/U-2011-ROTSI.pdf>
7. Довкілля України 2011: статистичний збірник. Київ: Державна служба статистики. 2012. 195 с. URL: [https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv\\_u/07/Arch\\_dov\\_zb.htm](https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/07/Arch_dov_zb.htm)
8. Приходько В.Ю. Дослідження регіональних особливостей захоронення твердих побутових відходів в Україні. Вісник ХНУ, серія «Екологія». Вип. 21. 2019. С. 51-62.
9. Бездухов О.А. Кластерний підхід до дослідження динаміки накопичення і розподілу твердих побутових відходів (на прикладі Чернігівської області). Науковий Вісник Херсонського державного університету. Вип. 11. 2019. С. 81-87.
10. Особливості логістичних процесів транспортування комунальних відходів та відходів руйнації / Пацева І.Г., Валерко Р.А., Пацев І.С., Палій О.В. Екологічні науки. №5(50). 2023. С. 187-192. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.27>
11. Simulation modeling for predicting the formation of municipal waste / Viktoriia Khrutba, Tetiana Morozova, Iryna Kotsiuba, Volodymyr Shamrai. Mathematical Modeling and Simulation of System (2020). P. 24-35 / URL: [https://www.researchgate.net/profile/Tetiana-Morozova/publication/343981023\\_Simulation\\_Modeling\\_for\\_Predicting\\_the\\_Formation\\_of\\_Municipal\\_Waste/links/5fece51b45851553a0099e1e/Simulation-Modeling-for-Predicting-the-Formation-of-Municipal-Waste.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Tetiana-Morozova/publication/343981023_Simulation_Modeling_for_Predicting_the_Formation_of_Municipal_Waste/links/5fece51b45851553a0099e1e/Simulation-Modeling-for-Predicting-the-Formation-of-Municipal-Waste.pdf)



12. Березюк О.В. Математичне моделювання та прогнозування об'ємів утворення твердих побутових відходів та площ полігонів і сміттєзвалищ в Україні. Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві», №2. 2009. С. 88-91.
13. Приходько В.Ю., Сафранов Т.А. Дослідження сучасних змін утворення побутових відходів в регіонах України // Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. VIII Міжнародний конгрес. 16-18 жовтня 2024 р. Львів. С. 32.
14. Звіт про стан сфери управління побутовими відходами в Україні за 2023 рік. URL: <https://mtu.gov.ua/content/upravlinnya-pobutovimi-vidhodami.html> (дата звернення 7.11.2024).

Стаття надійшла до редакції 17.11.2024 і прийнята до друку після рецензування 30.01.2025

## REFERENCES

1. Global Waste Management Outlook. (2015). UNEP. 332 p.
2. Kaza Silpa, Yao Lisa C., Bhada-Tata Perinaz, Van Woerden, Frank. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: World Bank. 271 p. doi:10.1596/978-1-4648
3. Collection of Municipal Solid waste in Developing Countries. (2010). UN-Habitat. 200 p.
4. Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614>
5. Report on the state of municipal solid waste management in Ukraine for 2023. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymi-vidhodamy-v-ukrayini-za-2021-rik/> [in Ukrainian].
6. National report on the state of the environment in Ukraine in 2011. (2012). Kyiv: Ministry of ecology and natural resources of Ukraine. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/U-2011-ROTSI.pdf> [in Ukrainian].
7. Environment of Ukraine 2011. (2012). Kyiv: State Statistics Service. [https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv\\_u/07/Arch\\_dov\\_zb.htm](https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/07/Arch_dov_zb.htm) [in Ukrainian].
8. Prykhodko, V. Yu. (2019). Regional features research of municipal solid waste disposal in Ukraine. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University*, 21, 51-62 <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-21-04> [in Ukrainian].
9. Bezdukhov, O.A. (2019). Cluster approach to studying the current state of accumulation and spatial distribution of solid household waste. *Scientific Bulletin of Kherson State University*, 11, 81-87. <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2019-11-11> [in Ukrainian].
10. Patseva, I., Valerko, R., Patsev, I. & Paliy, O. (2023). Peculiarities of logistics processes of transportation of utilities and ruination. *Environmental Sciences*, №5(50), 187-192. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.27> [in Ukrainian].
11. Viktoriia Khrutba, Tetiana Morozova, Iryna Kotsiuba & Volodymyr Shamrai (2020). Simulation modeling for predicting the formation of municipal waste. *Mathematical Modeling and Simulation of System*. [https://www.researchgate.net/profile/Tetiana-Morozova/publication/343981023\\_Simulation\\_Modeling\\_for\\_Predicting\\_the\\_Formation\\_of\\_Municipal\\_Waste/links/5feca51b45851553a0099e1e/Simulation-Modeling-for-Predicting-the-Formation-of-Municipal-Waste.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Tetiana-Morozova/publication/343981023_Simulation_Modeling_for_Predicting_the_Formation_of_Municipal_Waste/links/5feca51b45851553a0099e1e/Simulation-Modeling-for-Predicting-the-Formation-of-Municipal-Waste.pdf)
12. Bereziuk, O. (2009). Mathematical modelling and forecasting of solid waste generation and landfill and dumping area in Ukraine. *Modern technology, Materials and Design in Construction*, №2, 88-91 [in Ukrainian].
13. Prykhodko, V, Safranov, T. (2024). Study of current changes in municipal waste generation in the regions of Ukraine. *Sustainable development: environmental protection. Energy saving. Rational use of natural resources* [in Ukrainian].

14. Report on the state of household waste management in Ukraine for 2023. <https://mtu.gov.ua/content/upravlinnya-pobutovimi-vidhodami.html> (date of application 15.10.2024) [in Ukrainian].

*The article was received 17.11.2024 and was accepted after revision 30.01.2025*

**Приходько Вероніка Юрїївна**

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

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

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

**Сафранов Тамерлан Абїсалович**

д.г.-м.н., професор, професор кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0928-5121> **e-mail:** [safranov@ukr.net](mailto:safranov@ukr.net)

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

УДК 621.791: 614.8

**Oleg Levchenko**, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of the Labour Protection, Industrial and Civil Safety

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9737-7212> **e-mail:** levchenko.opcb@ukr.net

**Yury Polukarov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6261-3991> **e-mail:** polukarov@ukr.net

**Olena Zemlyanska**, Senior lecturer of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9608-3677> **e-mail:** o\_zemlyanska@i.ua

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

### HYGIENIC CHARACTERISTICS OF WELDING METHODS AND WELDING MATERIALS

**Abstract.** *The purpose of this work is to assess the hygienic characteristics of various arc welding methods and welding materials and to identify the main factors that affect the degree of risk of hazardous effects of welding aerosol on the body of welders. The assessment methodology was based on the study of the levels of welding aerosol release and its chemical composition depending on the content of components in welding materials that intensify the process of aerosol formation, welding modes and specific properties of the welding methods themselves. The study made it possible to identify welding materials, the use of which is accompanied by the highest levels of welding aerosol release during manual arc welding with covered electrodes, submerged arc welding and mechanized welding. The results obtained make it possible to choose safer welding materials in terms of hygiene for the above-mentioned welding methods. Also, based on the obtained research results, it becomes possible to form substantiated recommendations on the choice of measures and means of protecting welders and auxiliary personnel from harmful factors accompanying welding processes. The novelty of the research lies in the first comprehensive analysis of the hygienic characteristics of arc welding methods and welding materials. Prospects for further research include the development of innovative means of collective and individual protection, as well as the study of the long-term impact of harmful factors on the body of workers. The main limitation is the local nature of the experiments, which requires expanding the scale of the study to confirm the correlation of the results obtained for other welding materials of both domestic and foreign production.*

**Key words:** *arc welding, hygienic assessment, aerosol, emission level, chemical composition, submerged arc welding, mechanized welding.*

О.Г. Левченко, Ю.О. Полукаров, О.В. Землянська

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

## ГІГІЄНИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБІВ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

***Анотація.** Мета даної роботи – оцінити гігієнічні характеристики різних способів дугового зварювання та зварювальних матеріалів і виявити основні чинники, які впливають на ступінь ризику небезпечного впливу зварювального аерозолю на організм зварників. В основу методики оцінки було покладено дослідження рівнів виділення зварювального аерозолю та його хімічного складу в залежності від вмісту у зварювальних матеріалах компонентів, які інтенсифікують процес утворення аерозолів, режимів зварювання та специфічних властивостей самих способів зварювання. Проведене дослідження надало можливість визначити зварювальні матеріали, використання яких супроводжується найвищими рівнями виділення зварювальних аерозолів під час ручного дугового зварювання покритими електродами, при зварюванні під флюсом та механізованому зварюванні. Отримані результати дають можливість обирати більш безпечні в гігієнічному відношенні зварювальні матеріали для вищезазначених способів зварювання. Також на підставі отриманих результатів дослідження з'являється можливість формувати обґрунтовані рекомендації щодо вибору заходів та засобів захисту зварників і допоміжного персоналу від шкідливих факторів, що супроводжують зварювальні процеси. Новизна дослідження полягає у вперше здійсненому комплексному аналізі гігієнічних характеристик способів дугового зварювання та зварювальних матеріалів. Перспективи подальших досліджень передбачають розробку інноваційних засобів колективного та індивідуального захисту, а також вивчення довгострокового впливу шкідливих факторів на організм працівників. Основним обмеженням є локальний характер проведених експериментів, що потребує розширення масштабів дослідження для підтвердження кореляції отриманих результатів для інших зварювальних матеріалів як вітчизняного, так й зарубіжного виробництва.*

***Ключові слова:** дугове зварювання, гігієнічна оцінка, аерозоль, рівень виділення, хімічний склад, зварювання під флюсом, механізоване зварювання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.82-94>

### Вступ

Особливістю умов праці зварників є наявність низки характерних шкідливих і небезпечних виробничих факторів, як невід'ємного наслідку зварювального процесу. Серед них найбільшу загрозу для здоров'я зварників становить зварювальний аерозоль (ЗА), від якого й досі зварник захищений недостатньо.

Ступінь ризику небезпечного впливу ЗА на організм зварника, насамперед, визначається способом зварювання, видом та складом (маркою) зварювального матеріалу. Характер розвитку і тяжкість перебігу захворювань зварників, викликаних шкідливими речовинами ЗА, залежать від їх концентрації в зоні дихання. Нижче наведено дані про санітарно-гігієнічні характеристики різних способів дугового зварювання.

**Постановка завдання.** У сучасному зварювальному виробництві значна частина працівників піддається впливу шкідливих факторів, які виникають під час виконання технологічних операцій. Основними джерелами небезпеки є високі рівні виділення зварювальних аерозолів, які забруднюють повітря в робочій зоні. Традиційні способи зварювання часто не відповідають сучасним вимогам безпеки, що зумовлює підвищений ризик професійних захворювань серед зварників.

Зважаючи на це, основними завданнями дослідження є:

1. Проведення гігієнічної оцінки найбільш поширених способів дугового зварювання.

2. Аналіз складу та характеристик зварювальних матеріалів, їхньої ролі у формуванні шкідливих виділень.

3. Порівняння ефективності традиційних методів контролю забруднення з інноваційними підходами, зокрема сучасними вентиляційними системами та засобами індивідуального захисту.

4. Формування рекомендацій щодо вибору оптимальних технологій зварювання та використання безпечних матеріалів.

Результати цього дослідження мають на меті розробку науково обґрунтованих рішень для зменшення шкідливого впливу зварювальних процесів, покращення гігієнічних умов праці та підвищення ефективності захисту органів дихання зварників.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У вітчизняній та зарубіжній літературі значна увага приділяється питанням удосконалення технологій зварювання, зокрема впровадженню новітніх методів і матеріалів. Дослідження у сфері зварювальних процесів переважно фокусуються на підвищенні ефективності процесів зварювання, покращенні міцності з'єднань та якості зварювальних швів. Зокрема, у роботах [1, 2] розглядається застосування інноваційних зварювальних матеріалів для підвищення якості зварного шва. Проте, дослідження гігієнічних показників процесів зварювання та впливу зварювальних аерозолів на працівників залишаються недостатньо висвітленими.

Особливу увагу привертає вплив способу зварювання на якість повітря робочої зони. Як зазначено в [3], ручне електродугове зварювання покритими електродами, зварювання під флюсами та механізоване зварювання в захисних газах супроводжується значним виділенням шкідливих аерозолів та газів. У роботі [4] було підтверджено, що різні способи зварювання створюють різні рівні впливу на повітряне середовище робочої зони, що зумовлено типом зварювальних матеріалів та обладнання. Наприклад, процеси ручного дугового зварювання характеризуються підвищеним виділенням зварювальних аерозолів, які включають важкі метали та токсичні сполуки.

Дослідження [5] демонструє, що використання сучасних зварювальних апаратів дозволяє зменшити вплив на стан повітря, проте остаточного вирішення проблеми не досягнуто. Крім того, в роботі [6] розглядаються питання автоматизації процесів зварювання, що дає змогу мінімізувати безпосередній контакт працівників із шкідливими факторами. Водночас, автори зазначають, що навіть за умови застосування автоматизованого обладнання доводиться говорити про небезпечний рівень шкідливих речовин у повітрі робочої зони, особливо у разі використання порошкових електродів.

Аналіз літературних даних свідчить, що необхідність комплексного підходу до визначення гігієнічних характеристик способів зварювання та зварювальних матеріалів є актуальною. Досі залишаються невирішеними питання розробки ефективних заходів щодо зменшення шкідливого впливу на працівників, а також створення методичних підходів для оцінювання цих впливів у реальних виробничих умовах.

**Метою дослідження** є гігієнічна оцінка впливу різних способів дугового зварювання та зварювальних матеріалів на стан повітряного середовища робочої зони, виявлення основних факторів ризику для здоров'я зварників та розробка рекомендацій щодо мінімізації цих впливів.

## Результати дослідження

### *Ручне дугове зварювання покритими електродами*

Рівні виділень і хімічний склад ЗА, які утворюються при зварюванні покритими електродами, визначаються низкою факторів [7]:

- вмістом у шлаковому розплаві, що утворюється в результаті плавлення покриття на торці електрода, хімічних елементів чи сполук з високою пружністю пари, які вносять великий вклад в утворення аерозолів;
- характеристикою основності (кислотності) шлаку, від якої залежить інтенсивність випаровування окремих його складових;
- окиснювальним потенціалом атмосфери дуги;
- діаметром електрода і режимом зварювання (сила зварювального струму та напруга дуги).

У вітчизняній і зарубіжній практиці ручного дугового зварювання використовуються електроди з покриттями, які розподіляються на такі основні види: кислі, рутилові, целюлозні, основні (фтористо-кальцієві); а також змішані види покриття: рутилово-кислі (ільменітові), рутил-целюлозні, рутил-основні тощо. У залежності від виду (складу) цих покриттів здійснюється необхідний вплив на характеристики зварного шва. Разом з тим склад електродного покриття визначає токсичність ЗА, що утворюються під час застосування електродів певних марок для електродугового зварювання.

Результати досліджень рівнів виділень ЗА, виконані в різних країнах, показують, що найбільші виділення аерозолу характерні для електродів з целюлозним покриттям. За ними йдуть електроди з покриттям основного виду. Електроди з кислим, рутиловим та ільменітовим покриттям за рівнем виділення ЗА розрізняються між собою незначно, а порівняно з електродами з целюлозним та основним покриттям характеризуються значно меншим виділенням аерозолу (рис. 1).

Найбільший рівень виділень ЗА у разі зварювання електродами з целюлозним покриттям пояснюється виділенням у великих кількостях газів: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, які утворюються в результаті згоряння органічних складових целюлозного покриття, надходженням в розплавлену краплю на торці електрода вуглецю, що утворюється в результаті розкладання целюлози в покритті, і підвищенням інтенсивності виділення ЗА через підсилення інтенсивності вибуху рідких крапель внаслідок окиснення вуглецю та утворення CO.

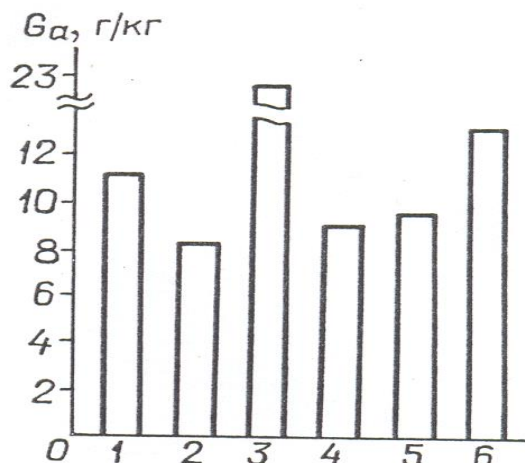


Рис. 1. Питомі виділення ЗА під час зварювання електродами з різними покриттями: 1 – ільменітове; 2 – рутил-карбонатне; 3 – целюлозне; 4 – рутилове; 5 – кисле; 6 – основне (діаметр електрода – 5 мм, зварювальний струм – 230 А) [7]

Високий рівень виділення ЗА при зварюванні електродами з основним покриттям обумовлено наявністю в покритті летучих сполук фтору ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ) і високою основністю шлакової фази, яка сприяє більш інтенсивному надходженню в ЗА сполук лужних металів. Великий вміст карбонатів (мармуру, крейди, вапняку, магнезиту, доломіту) в покритті сприяє стисненню дуги вуглекислим газом, який утворюється при їх розкладанні, що також призводить до підвищення інтенсивності виділення ЗА.

Аналіз багатьох даних щодо визначення хімічного складу ЗА показує, що при зварюванні електродами з рутиловим, кислим і ільменітовим покриттям утворюються ЗА близькі за хімічним складом. Основою ЗА є оксиди заліза. Із шлакової фази в ЗА переходять, переважно,  $\text{SiO}_2$  (20...30%),  $\text{K}_2\text{O}$  (5...10%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (6...10%). Вміст у ЗА сполук кальцію, магнію, алюмінію та титану незначний: 0,1...0,8%  $\text{CaO}$ ; 0,1...3%  $\text{MgO}$ ; 0,1...0,3%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 0,1...2%  $\text{TiO}_2$ . Вміст найбільш токсичної складової ЗА – сполук марганцю – при зварюванні електродами загального призначення складає 5...10%. Це є результатом випаровування його, переважно, з металевого розплаву, в якому концентрація марганцю при зварюванні електродами різних марок також змінюється в порівняно вузькому інтервалі.

Склад ЗА, який утворюється у випадку зварювання целюлозними електродами, відрізняється від складу, що утворюється у разі зварювання зазначеними вище електродами, лише більш високим вмістом оксидів заліза внаслідок деякого зниження кількості інших складових.

Склад ЗА під час зварювання електродами з покриттям основного виду істотно відрізняється: наявністю великої кількості розчинних і нерозчинних фторидів (10...20% в перерахунку на фтор); більш високою порівняно зі зварюванням кислими, рутиловими та целюлозними електродами кількістю сполук лужних і лужно-земельних металів (6...25%  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 5...30%  $\text{K}_2\text{O}$ ; 7...15%  $\text{CaO}$ ; 0...8%  $\text{MgO}$ , причому сума  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  складає 20...40%, а їх

співвідношення визначається, головним чином, складом рідкого скла-зв'язуючого); більш низьким вмістом оксидів кремнію (4...12%) та заліза (10...20%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Ці відмінності обумовлені, в першу чергу, наявністю фторидів у складі основного покриття і високою основністю шлаків, що утворюються в процесі плавлення покриття електродів. Крім того, під час зварювання електродами з покриттям основного виду поряд з фторидами у складі ЗА в повітрі присутні також токсичні газоподібні фториди (фтористий водень, тетрафторид кремнію тощо). Вміст оксидів марганцю в ЗА, що утворюється при зварюванні електродами з основним покриттям, нижчий, ніж за умови зварювання електродами інших видів, і складає звичайно 3...5%. Це пояснюється більш низьким вмістом феромарганцю в покритті основного виду [7].

Найбільш шкідливими речовинами, які входять до складу ЗА, що утворюються в процесі зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей з покриттями рутилового, кислого, ільменітового та целюлозного видів, є марганець, а під час використання електродів з покриттям основного виду – сполуки фтору (особливо газоподібні).

За умов зварювання оцинкованих сталей у складі ЗА присутні токсичні сполуки цинку.

У процесі зварювання легованих, у тому числі нержавіючих сталей, у складі ЗА, крім токсичних сполук марганцю та фтору, з'являються ще більш токсичні сполуки шестивалентного хрому і нікелю з канцерогенними властивостями. Хром у складі ЗА присутній у вигляді двох різних за токсичністю сполук: в шестивалентному стані у вигляді хроматів та біхроматів натрію і калію ( $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), які утворюються в результаті взаємодії хрому зі сполуками калію та натрію із рідкого скла, і в тривалентному стані у вигляді  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Згідно з гігієнічним регламентом [8], шестивалентний хром відноситься до першого, а тривалентний – до третього класу небезпеки. Таким чином, в процесі зварювання електродами хромонікелевих легованих сталей сполуки шестивалентного хрому є компонентами, які визначають токсичність ЗА.

Основними токсичними компонентами ЗА, що утворюються під час зварювання кольорових металів (алюмінію, міді та ін.), є їхні оксиди.

Одночасно із ЗА в повітря робочої зони можуть надходити й такі шкідливі гази, як фтористий водень, тетрафтористий кремній, оксиди азоту, оксид вуглецю, озон [9–11]. Ці гази можуть забруднювати повітря до рівня, що перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК). Окрім цього, слід враховувати, що величини ГДК одних і тих же шкідливих речовин у нормативних документах різних країн істотно відрізняються. Тому електроди однієї й тієї ж марки у різних країнах можуть належати до різних гігієнічних класів. Разом з цим, ще певним недоліком гігієнічної класифікації зварювальних матеріалів є те, що прийнята в ній форма для запису даних про аерозолі [12] не враховує наявність у повітрі робочої зони зазначених газоподібних компонентів, особливо фтористого водню, тетрафтористого кремнію та озону, що належать до шкідливих речовин першого класу небезпеки [13] і залежно від їх концентрації в повітрі можуть бути визначальними токсичними компонентами.



### **Зварювання під флюсом**

Зварювання під флюсом – прогресивний процес не тільки за технічними, а й за гігієнічними характеристиками. Під час його виконання зварювальна дуга закрита шаром флюсу, внаслідок чого усувається шкідливий вплив випромінювання дуги, відсутні іскри та бризки розплавленого металу, рівень шуму дуги незначний і сама головна перевага – рівень виділень ЗА на 1...2 порядки нижчий, ніж при зварюванні покритими електродами і в захисних газах [13].

Джерелами утворення ЗА є, переважно, сам флюс, а також електродний дріт. Разом з тим шар флюсу виконує роль фільтра, в процесі проходження через який, основний потік ЗА осаджується і лише незначна частина розсіюється в навколишню атмосферу.

Рівень виділень ЗА визначається потужністю зварювальної дуги, тобто залежить від діаметра зварювального дроту, що використовується, і, відповідно, режиму зварювання.

Хімічний склад ЗА визначається складом флюсу та електродного дроту. Обов'язковими компонентами ЗА, що утворюється при зварюванні під флюсом, є сполуки марганцю (9...12%), кремнію (3...9%), заліза (30...70%), а також розчинні і нерозчинні фториди. Крім того, при зварюванні під флюсом в повітря надходять фтористий водень та тетрафтористий кремній, а також незначна кількість оксидів азоту і монооксиду вуглецю [13].

Гігієнічну характеристику ЗА, який утворюється з використанням типових марок флюсів, наведено в таблиці 1, необхідний об'єм повітря (повітрообмін) загальнообмінної вентиляції – в таблиці 2, з якої видно, що для забезпечення норм ГДК при зварюванні під флюсом продуктивність вентиляції можна знизити в десятки або сотні разів порівняно зі зварюванням покритими електродами.

Таблиця 1. Рівні виділень ЗА при автоматичному зварюванні під флюсами дротом Св-08ХМ діаметром 3 мм,  $I_{зв} - 550...600$  А,  $U_{д} - 45...47$  В (за даними Київського інституту медицини праці)

Марка флюсу	Інтенсивність утворення ЗА, мг/хв										
	ЗА	Si	Fe	Mn	Al	Mg	Ca	HF	SiF <sub>4</sub>	NO <sub>x</sub>	CO
АН-47	6,3	0,43	1,42	0,34	0,19	0,10	0,21	0,33	0,62	0,24	8,1
АН-22	7,1	0,55	0,7	0,28	0,33	0,26	0,65	0,13	0,52	–	12
АН-348 А	7,2	–	1,16	2,75	–	–	–	4,3	–	0,96	–

Зварювання під плавленими флюсами супроводжується наявністю ЗА і пилу флюсу в зоні дихання зварника, концентрація яких може досягати 3...50 мг/м<sup>3</sup>, а за умов використання керамічних флюсів – 50...170 мг/м<sup>3</sup>. При застосуванні керамічних флюсів концентрація розчинних фторидів в повітрі така ж сама, як і в процесі зварювання під плавленими флюсами, а вміст монооксиду вуглецю досягає (для флюсів К-2п, К-5) 400...500 мг/м<sup>3</sup>. Причиною цього є наявність в керамічних флюсах карбонатів кальцію та магнію, які, розкладаючись, призводять до утворення великих кількостей діоксиду і монооксиду вуглецю. Крім того, технологія виготовлення керамічних флюсів дозволяє вводити в них легуючі сплави (феромарганець, ферохром тощо), що призводить до підвищеного вмісту в ЗА токсичних сполук марганцю, хрому та інших речовин.

Таблиця 2. Питомі виділення ЗА та необхідний повітрообмін вентиляції при зварюванні під флюсами

Марки флюсів	Питомі виділення компонентів ЗА, які визначають токсичність, г/кг		Повітрообмін вентиляції, м <sup>3</sup> /кг дроту
	Mn	HF	
АН-30, АН-60, АН-65, АН-67, АН-348А, 48-ОФ-11	0,012...0,07	0,002...0,004	40...570
ФЦ-2А, ФЦ-6, ФЦ-7, ФЦ-12, АН-26, АН-64, 48-ОФ-6М, ОСЦ-45	–	0,017...0,20	40...400
АКН-18	–	0,042...0,15	80...300

За умов зварювання легованих сталей під флюсами у складі ЗА може бути присутній нікель, шестивалентний та тривалентний хром. Причому в процесі використання керамічних флюсів концентрація шестивалентного хрому вища, ніж при зварюванні під плавленими флюсами. Це пояснюється наявністю в керамічних флюсах рідкого скла як зв'язуючого, що вміщує оксиди натрію і калію, які зв'язують нестійкий хромовий ангідрид (CrO<sub>3</sub>) в хромати калію та натрію [13].

Найбільш шкідливими компонентами ЗА, що утворюються в процесі зварювання під флюсами вуглецевих і низьколегованих сталей, є фтористий водень, тетрафтористий кремній, розчинні фториди натрію та калію, сполуки марганцю; якщо ж це зварювання легованих сталей – такими речовинами є сполуки шестивалентного хрому й нікелю.

### ***Механізоване зварювання***

Хімічний склад і рівні виділень ЗА в процесі механізованого зварювання в захисних газах залежать від складу зварювального дроту, захисного газу та режимів зварювання. При зварюванні дротом типової марки Св-08Г2С у вуглекислому газі інтенсивність виділення ЗА залежно від параметрів режиму зварювання і діаметра дроту коливається від 0,2 до 1,6 г/хв, питомі виділення – від 4,6 до 20,3 г/кг дроту. І хоча у складі зварювального дроту вміст марганцю незначний (1,8...2,1%), його вміст в ЗА, що утворюється, досягає 11,1...13,7%. Концентрація діоксиду кремнію складає 7,6...10%, а заліза – 54...85%. З підвищенням вмісту легуючих елементів (Mn, Si) в зварювальному дроті їх концентрація в ЗА та рівні виділень підвищуються [13].

Застосовуючи дроти, мікролеговані рідкоземельними металами (РЗМ), які вміщують незначну кількість церію (0,01...0,03%) і дещо знижену кількість марганцю (1,5...1,8%), рівні виділення ЗА і вміст у ньому токсичного марганцю знижується. Цьому сприяє не лише знижений вміст марганцю в дроті, але й можливість проводити зварювання струмом прямої полярності, за якої температура дуги нижча, ніж у дузі зворотної полярності [13, 14]. Такі переваги в гігієнічному відношенні забезпечують наявність в дроті РЗМ.

Крім ЗА, в процесі зварювання в захисних газах у зоні зварювальної дуги утворюються і шкідливі газоподібні речовини, склад яких визначається складом захисного газу. У випадку зварювання у вуглекислому газі в повітря робочої зони виділяється оксид вуглецю (чадний газ) з інтенсивністю 0,1...0,2 г/хв та оксиди азоту – 0,003...0,015 г/хв [14].

Основною причиною утворення оксиду вуглецю є дисоціація вуглекислого газу за високої температури зварювальної дуги. Оксиди азоту утворюються в результаті окиснення азоту повітря в процесі дії на нього теплоти і випромінювання зварювальної дуги [15]. Оскільки дуга горить в атмосфері захисного вуглекислого газу, то інтенсивність утворення оксидів азоту дуже невелика порівняно з утворенням оксиду вуглецю [16, 17].

У випадку використання в ролі захисного газу аргону або його суміші в повітрі робочої зони з'являється озон, який утворюється із кисню повітря та захисного газу під дією ультрафіолетового випромінювання дуги. Концентрація озону в початковий період зварювання висока, але потім він реагує з оксидом азоту із утворенням діоксиду азоту та кисню [18, 19]. Причому озон утворюється не тільки в зоні дуги, а і на деякій відстані від неї. Концентрація озону в повітрі знижується пропорційно відстані віддалення від дуги [9, 20].

У процесі механізованого зварювання порошковими дротами у вуглекислому газі рутилового (ПП-АН8, ПП-АН10), рутил-флюоритного (ПП-АН9, ПП-АН18), а також самозахисними дротами карбонатно-флюоритного типу (ПП-АН7, ПП-АН11) утворюються ЗА і гази, що вміщують, крім марганцю, кремнію, заліза, оксидів азоту та вуглецю, також фтористий водень, тетрафтористий кремній, розчинні і нерозчинні фториди. Інтенсивність виділення ЗА у разі зварювання цих дротів вища, ніж за умов застосування дротів суцільного перерізу, виділення фтористого водню складає 16,6...56,7 мг/хв, тетрафтористого кремнію – 29,3...78,7 мг/хв [14, 21].

Таким чином, зварювання порошковими дротами, в залежності від їх складу, насамперед супроводжується виділенням у повітря робочої зони фтористих газів, розчинних фторидів та сполук марганцю.

У випадку використання хромонікелевих зварювальних і наплавних порошкових дротів, а також наплавних порошкових стрічок, у складі ЗА, крім фторидів, можуть бути присутні сполуки нікелю, шестивалентного та тривалентного хрому, які в залежності від їх вмісту в ЗА можуть визначати його токсичність.

У процесі зварювання активованим дротом інтенсивність утворення ЗА на оптимальних режимах нижча, ніж за умов використання порошкових дротів, і вища, ніж при зварюванні дротом суцільного перерізу типу Св-08Г2С. Вміст марганцю в ЗА, який утворюється у випадку зварювання активованим дротом, нижчий, ніж у випадку застосування дроту Св-08Г2С. Проте у складі таких ЗА з'являються легколетучі розчинні та нерозчинні сполуки фтору [13]. Збільшення діаметра дроту супроводжується зростанням інтенсивності утворення ЗА [15-17].

Найбільш токсичними компонентами ЗА у разі зварювання активованими дротами є сполуки марганцю та фтору.

## Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведене дослідження дозволило встановити взаємозв'язок між вибором способу зварювання, характеристиками зварювальних матеріалів та впливом цих факторів на гігієнічні умови праці зварників. Було встановлено, що вибір способу зварювання та зварювальних матеріалів має суттєвий вплив на формування гігієнічних умов у робочій зоні зварника. Крім того, виявлено суттєвий вплив хімічного складу аерозолів, що утворюються під час зварювання, на якість повітря у робочій зоні.

Аналіз літературних джерел показав, що існуючі методики оцінки впливу зварювальних процесів на гігієнічні умови праці мають певні недоліки. Це вимагає створення нових підходів до оцінки впливу шкідливих факторів.

Проведені дослідження дозволили визначити та дослідити специфіку впливу зварювальних процесів на гігієнічні умови праці для різних способів зварювання. Запропоновано комплексний підхід до гігієнічної оцінки умов праці зварників з урахуванням особливостей хімічного складу аерозолів. Це створює базу для подальших досліджень, що передбачають:

1. Дослідження взаємозв'язку між параметрами зварювального процесу та рівнями шкідливих факторів для оптимізації технологій зварювання.

2. Вибір нових матеріалів та технологічних рішень, які мінімізують виділення шкідливих речовин у робочій зоні.

3. Удосконалення методів моніторингу та контролю за гігієнічними умовами на робочих місцях зварників, зокрема впровадження автоматизованих систем оцінки та прогнозування.

Отримані результати та запропоновані напрями подальших досліджень сприятимуть подальшому вдосконаленню технологій зварювання, розробленню нових сучасних засобів захисту працівників та модернізації зварювального обладнання. Це дозволить підвищити безпеку та гігієну праці у зварювальному виробництві, сприятиме зниженню професійної захворюваності серед зварників та мінімізації витрат, пов'язаних з виплатами за роботу в шкідливих умовах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Martín, Ó., & De Tiedra, P. (2022). Advances in the control and improvement of quality in the resistance spot welding process. *Metals*, 12(11), 1810. <https://doi.org/10.3390/met12111810>.
2. Periyasamy, P. S., Sivalingam, P., Vellingiri, V. P., Maruthachalam, S., & Balakrishnapillai, V. (2024). A review of traditional and modern welding techniques for copper. *Welding International*, 38(10), 673-68. <https://doi.org/10.1080/09507116.2024.2413386>.
3. Knott, P., Csorba, G., Bennett, D., & Kift, R. (2023). Welding Fume: A Comparison Study of Industry Used Control Methods. *Safety*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/safety9030042>.
4. Quecke, E., Quemerais, B., & Hashisho, Z. (2023). Review of welding fume emission factor development. *Annals of Work Exposures and Health*, 67(6), 675-693. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxad024>.
5. Mahadevan, R., Jagan, A., Pavithran, L., Shrivastava, A., & Selvaraj, S. K. (2021). Intelligent welding by using machine learning techniques. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7402-7410. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1149>.

6. Klimecka-Tatar, D., Ulewicz, R., & Ingaldi, M. (2023). Minimizing occupational risk by automation of the special processes-based on occupational risk assessment. *Procedia Computer Science*, 217, 1145-1152. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.313>.
7. Походня, И. К., Горпенюк, В. Н., Миличенко С. С. и др. (1990). *Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов*. Киев: Наук. думка, 224.
8. Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони (Наказ МОЗ України). № 1596 (2020). Вилучено з: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0741-20#Text>.
9. Press, H. (1981). Formation des oxydes d'azote lors du soudage aux gaz. Mesures pour la prevention d'atteintes a la sante. *Soudage et Techniques Connexes*. (№ 516, pp. 207-212).
10. Sipek, L. Emission of gases pollutants during GTA Welding of Yorcibro Brass. (1988). *Intern. Inst. of Welding; Doc. VIII-1443-88*. (pp.16).
11. Sipek, L. & Smars, E. (1989). Ozone and nitrogen oxides in gas shielded arc welding. *Institute International de la Soudure (IIS/IIW)*, doc VIII-1486-89.
12. ДСТУ EN ISO 15011-4:2022. (2022). Здоров'я та безпека під час зварювання та суміжних процесів. Лабораторний метод відбирання проб диму та газів. Частина 4. Таблиці даних щодо диму. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
13. Левченко, О. Г. (2015). *Сварочные аэрозоли и газы: процессы образования, методы нейтрализации и средства защиты*. Киев: Наукова думка, 248.
14. Левченко, О. Г. & Метлицкий, В. А. (2003). Глава 6: Охрана труда при сварке. *Сварные строительные конструкции: Справ. изд. в 3-х томах*. К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 293-319.
15. Weman, K. (2012). Manual metal arc (MMA) welding with coated electrodes. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, *Welding Processes Handbook (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 99-103. <https://doi.org/10.1533/9780857095183.99>.
16. Murugan, S. S., & Sathiya, P. (2024). Analysis of welding hazards from an occupational safety perspective. *Vietnam journal of science, technology and engineering*, 66(3), 63-74. <http://dx.doi.org/10.31276/VJSTE.2023.0007>.
17. Saxena, V. (2023). Occupational Hazards and Safety Challenges in Welding Activity. *Indian Welding Journal*, 56(1). <https://doi.org/10.22486/iwj.v56i1.218496>.
18. Li, Y., Liu, W., Chen, Z., Jiang, L., & Ye, P. (2022). A novel approach for occupational health risk assessment and its application to the welding project. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134590>.
19. Van der Mee, V. (2021). Welding exposure scenarios. *Welding in the World*, 65(12), 2397-2401. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01182-4>.
20. Dhas, J. E. R., Lewise, K. A. S., & Laxmi, G. (2022). Submerged arc welding process parameter prediction using predictive modeling techniques. *Materials Today: Proceedings*, 64, 402-409. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.757>.
21. Kah, P., & Martikainen, J. (2013). Influence of shielding gases in the welding of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 1411-1421. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2024 і прийнята до друку після рецензування 23.12.2024

## REFERENCES

1. Martín, Ó., & De Tiedra, P. (2022). Advances in the control and improvement of quality in the resistance spot welding process. *Metals*, 12(11), 1810. <https://doi.org/10.3390/met12111810>
2. Periyasamy, P.S., Sivalingam, P., Vellingiri, V.P., Maruthachalam, S., & Balakrishnapillai, V. (2024). A review of traditional and modern welding techniques for copper. *Welding International*, 38(10), 673-68. <https://doi.org/10.1080/09507116.2024.2413386>

3. Knott, P., Csorba, G., Bennett, D., & Kift, R. (2023). Welding Fume: A Comparison Study of Industry Used Control Methods. *Safety*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/safety9030042>
4. Quecke, E., Quemerais, B., & Hashisho, Z. (2023). Review of welding fume emission factor development. *Annals of Work Exposures and Health*, 67(6), 675-693. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxad024>
5. Mahadevan, R., Jagan, A., Pavithran, L., Shrivastava, A., & Selvaraj, S. K. (2021). Intelligent welding by using machine learning techniques. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7402-7410. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1149>
6. Klimecka-Tatar, D., Ulewicz, R., & Ingaldi, M. (2023). Minimizing occupational risk by automation of the special processes-based on occupational risk assessment. *Procedia Computer Science*, 217, 1145-1152. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.313>
7. Pokhodnya, I. K., Gorpenyuk, V. N., Milichenko S. S. et al. (1990). Metallurgiya dugovoi svarki: Protsessy v duge i plavlenie elektrodov. Kiev: Nauk. dumka [in Russian].
8. Pro zatverdzhennia hihienichnykh rehlamentiv dopustymoho vmistu khimichnykh i biolohichnykh rechovyn u povitri robochoi zony (Nakaz MOZ Ukrainy). № 1596 (2020). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0741-20#Text> [in Ukrainian].
9. Press, H. (1981). Formation des oxydes d'azote lors du soudage aux gaz. Mesures pour la prevention d'atteintes a la sante. *Soudage et Techniques Connexes*, 516, 207-212.
10. Sipek, L. Emission of gases pollutants during GTA Welding of Yorcibro Brass. (1988). *Intern. Inst. of Welding; Doc. VIII-1443-88*, (pp. 16).
11. Sipek, L. & Smars, E. (1989). Ozone and nitrogen oxides in gas shielded arc welding. *Institute International de la Soudure (IIS/IIW)*, doc VIII-1486-89.
12. DSTU EN ISO 15011-4:2022. (2022). Zdrovia ta bezpeka pid chas zvariuvannia ta sumizhnykh protsesiv. Laboratornyi metod vidbyrannia prob dymu ta haziv. Chastyna 4. Tablytsi danykh schodo dymu. Kyiv: DP "UkrNDNTS" [in Ukrainian].
13. Levchenko, O.G. (2015). Svarochnye aerzoli i gazy: protsessy obrazovaniya, metody neutralizatsii i sredstva zashchity. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
14. Levchenko, O.G. & Metlitskii, V.A. (2003). Glava 6: Okhrana truda pri svarke. Svarnye stroitelnye konstruktsii: Sprav. izd. v 3-kh tomakh (pp. 293-319). K.: IES im. Ye.O. Patona [in Russian].
15. Weman, K. (2012). Manual metal arc (MMA) welding with coated electrodes. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, *Welding Processes Handbook (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 99-103. <https://doi.org/10.1533/9780857095183.99>
16. Murugan, S.S., & Sathiya, P. (2024). Analysis of welding hazards from an occupational safety perspective. *Vietnam journal of science, technology and engineering*, 66(3), 63-74. <http://dx.doi.org/10.31276/VJSTE.2023.0007>
17. Saxena, V. (2023). Occupational Hazards and Safety Challenges in Welding Activity. *Indian Welding Journal*, 56(1). <https://doi.org/10.22486/iwj.v56i1.218496>
18. Li, Y., Liu, W., Chen, Z., Jiang, L., & Ye, P. (2022). A novel approach for occupational health risk assessment and its application to the welding project. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134590>
19. Van der Mee, V. (2021). Welding exposure scenarios. *Welding in the World*, 65(12), 2397-2401. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01182-4>
20. Dhas, J. E. R., Lewise, K. A. S., & Laxmi, G. (2022). Submerged arc welding process parameter prediction using predictive modeling techniques. *Materials Today: Proceedings*, 64, 402-409. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.757>
21. Kah, P., & Martikainen, J. (2013). Influence of shielding gases in the welding of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 1411-1421. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>

*The article was received 25.09.2024 and was accepted after revision 23.12.2024*

**Левченко Олег Григорович**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Адреса робоча:** 03056, Україна, м. Київ-56, Берестейський проспект, 37

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9737-7212> **e-mail:** levchenko.opcb@ukr.net

**Полукаров Юрій Олексійович**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Адреса робоча:** 03056, Україна, м. Київ-56, Берестейський проспект, 37

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6261-3991> **e-mail:** polukarov@ukr.net

**Землянська Олена Василівна**

старший викладач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Адреса робоча:** 03056, м. Київ-56, Берестейський проспект, 37

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9608-3677> **e-mail:** o\_zemlyanska@i.ua

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

UDK 528.83/.88:(504:627.8)(477.41)

**Oleksandr Azimov**<sup>1</sup>, D. S. (Geology), Head Researcher  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5210-3920> **e-mail:** [azimov@casre.kiev.ua](mailto:azimov@casre.kiev.ua)

**Vasyl Trysnyuk**<sup>2</sup>, D. S. (Engineering), Professor, Head of Department  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** [trysnyuk@ukr.net](mailto:trysnyuk@ukr.net)

**Oleksii Shevchenko**<sup>3</sup>, D. S. (Geology), Head Researcher  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5791-5354> **e-mail:** [shevch62@gmail.com](mailto:shevch62@gmail.com)

**Olga Tomchenko**<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6975-9099> **e-mail:** [tomch@i.ua](mailto:tomch@i.ua)

**Artem Andreiev**<sup>1</sup>, PhD, Junior Researcher  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6485-449X> **e-mail:** [artem.a.andreev@gmail.com](mailto:artem.a.andreev@gmail.com)

**Sergii Kireev**<sup>4</sup>, General Director  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7059-3655> **e-mail:** [kireev@ecocentre.kiev.ua](mailto:kireev@ecocentre.kiev.ua)

<sup>1</sup>Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of IGS of NASU, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Ukrainian Research Hydrometeorological Institute under the Ministry for Emergencies and NASU, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup>State Specialized Enterprise "Ecocentre", Chornobyl, Ukraine

## ASSESSMENT OF THE CURRENT COMPONENT OF UNDERFLOODING WITHIN THE TERRITORY OF THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE BY THE METHODS OF REMOTE SENSING TECHNOLOGIES

**Abstract.** According to the results of the thematic interpretation of the satellite imaging data for the recent years in the territory of the Prypiat Left-Bank Drainage System of the Chornobyl Exclusion Zone, the probable onset of the multi-aqueous phase of water content in the frame of the full hydrological cycle is predicted at the end of 2022. The attribute of multi-water phase emerging is emphasized by statistical data relatively an increase of the total amount of atmospheric precipitation in the cold period during September-October-November-December 2022 and 2023 within the entire catchment basin for the left-bank part of the Prypiat River. These data are fully consistent with the established trend of increasing extents of <sup>90</sup>Sr activity, which is carried away with runoff from the left-bank polder area. According to the calculated estimates of <sup>90</sup>Sr activity levels, 0.02 and 0.034 TBq could be removed in 2022 and 2023, respectively. This radioactive carryover increased by 6.4 times, if 2021 is compared with 2023 and by 34 times, if 2020 compared with 2023. Thus, a direct



relationship is observed between the  $^{90}\text{Sr}$  activity levels removed from the territory of the left-bank polder to the Prypiat River with the values  $^{90}\text{Sr}$  of the areas of the open water surface mapped by means of remote sensing technologies within its boundaries, and the values  $^{90}\text{Sr}$  of the total amount of atmospheric precipitation in the cold period of the year on the adjacent left-bank part of the water catchment basin of the Prypiat River. Hence, the prediction as to the growing  $^{90}\text{Sr}$  activity levels due to its removal with the runoff from the area of the left-bank polder to the Prypiat River in 2024-2026, is substantiated.

**Keywords:** Chernobyl Exclusion Zone, Left Bank Drainage System, underflooding, monitoring, remote sensing methods, surface runoff, radionuclide carry-over.

О.Т. Азімов<sup>1</sup>, В.М. Триснюк<sup>2</sup>, О.Л. Шевченко<sup>3</sup>, О.В. Томченко<sup>1</sup>, А.А. Андрєєв<sup>1</sup>, С.І. Кіреєв<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України», м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

<sup>3</sup>Український гідрометеорологічний інститут Державної служби України з надзвичайних ситуацій та НАН України, м. Київ, Україна

<sup>4</sup>Державне спеціалізоване підприємство “Екоцентр”, м. Чорнобиль, Україна

## ОЦІНКА СУЧАСНОЇ СКЛАДОВОЇ ПІДТОПЛЕННЯ НА ТЕРИТОРІЇ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Анотація.** За результатами тематичного дешифрування матеріалів космічних знімів останніх років на території Прип'ятської лівобережної осушувальної системи Чорнобильської зони відчуження прогнозувалося вірогідне настання наприкінці 2022 р. багатоводної фази водності в рамках повного гідрологічного циклу. Встановлено зростання обводнення території у 2022 і 2023 рр. порівняно з попередніми роками. Ознака формування багатоводної фази підкреслюється статистичними даними щодо відносного збільшення у холодний період протягом вересня-жовтня-листопада-грудня 2022 і 2023 рр. сумарної кількості атмосферних опадів у межах усієї території лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять. З цими даними цілком узгоджується встановлена тенденція до зростання обсягів активності  $^{90}\text{Sr}$ , що виносяться зі стоком з району лівобережного польдера. За розрахунковими оцінками обсягів активності  $^{90}\text{Sr}$  у 2022 і 2023 рр. могло бути винесено відповідно 0,02 та 0,034 ТБк. Порівняно з 2021 р. у 2023 р. це винесення зросло у 6,4 раза, а порівняно з 2020 р. – у 34 раза. Таким чином, простежується пряма залежність між винесеними з території лівобережного польдера до р. Прип'ять обсягами активності  $^{90}\text{Sr}$  зі значеннями площ відкритої водної поверхні, закартованих засобами дистанційних технологій в її межах, та значеннями сумарної кількості атмосферних опадів у холодний період року на прилеглий лівобережній частині водозбірного басейну р. Прип'ять. У зв'язку з цим обґрунтовується прогноз щодо зростання у 2024-2026 рр. обсягів активності  $^{90}\text{Sr}$ , що виноситиметься зі стоком з району лівобережного польдера до р. Прип'ять.

**Ключові слова:** Чорнобильська зона відчуження, лівобережна осушувальна система, підтоплення, моніторинг, дистанційні методи, поверхневий стік, винесення радіонуклідів.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.95-110>

## Постановка проблеми, цілі та завдання роботи

Постановка проблеми досліджень просторово-часових змін у чутливій до них системі «поверхневі води – суходіл» аргументується необхідністю розробки ефективних підходів стосовно захисту відкритих водойм територій від екологічно небезпечних полютантів, що можуть надходити власне зі сторони суходолу або ж інших, забрудненіших водних об'єктів. Подібні процеси стосуються й вторинного забруднення водойм техногенними радіонуклідами [1–5 та ін.]. Означена **проблема є актуальною** й для території **Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ)**, зокрема, й для розташованої в її межах *Прип'ятської лівобережної осушувальної системи* [1–3].

Територія Зони відчуження наразі переважно являє собою Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник [6]. З аналізу відповідної картосхеми слідує, що південно-східна частина заповідника охоплює пониззя р. Прип'ять в районі її впадіння до Київського водосховища, а також північно-західне верхів'я останнього. Отож, процеси перерозподілу радіонуклідів чорнобильського походження, що відбуваються в межах лівобережної меліоративної системи ЧЗВ, через водні потоки (в основному поверхневі, меншою мірою підземні) потенційно впливають на радіоекологічний стан як території Зони зокрема, так і біосферного заповідника загалом. Разом з тим відомо [7], що близько 70% українців у побуті використовує дніпровську воду. Принаймні така статистика була дійсною до 24 лютого 2022 р., тобто до початку воєнної агресії проти нашої держави з боку росії. Таким чином, існує гостра необхідність у контролі та запобіганні міграції радіонуклідів водним шляхом із території ЧЗВ у басейн р. Дніпро з метою зниження витрат на очищення води, особливо питного споживання, та для зменшення дозового навантаження на населення України.

Отже, з-поміж ряду завдань у вирішенні зазначеної комплексної проблеми головною **ціллю** роботи є виконання аналізу стану поточної ситуації щодо поширення водної поверхні на території Прип'ятської лівобережної осушувальної системи, яка й являє собою район детальних досліджень. Основним інформаційним ресурсом при цьому є наявні актуальні матеріали дистанційних знімань. Вагомим **завданням** роботи також є здійснення оцінки ефективності експлуатації водоохоронного комплексу в межах системи, зокрема, після припинення у 2015 р. постійного функціонування розташованої тут польдерної насосної станції (ПНС), з акцентуацією на особливості радіоекологічної обстановки, що таким чином виникла в її межах.

## Аналіз результатів попередніх досліджень й публікацій

Комплекс наземних гідрологічних, радіоекологічних і сучасних дистанційних методів у процесі моніторингових досліджень важкодоступних, заболочених, значною мірою радіонуклідно забруднених територій, зокрема території ЧЗВ і прилеглих до неї ділянок, активно почав застосовуватися приблизно через 10 років після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р., тобто з середини 1990-х рр. [1–3, 5, 8–11 та ін.]. Використовуючи наявні дані космічного знімання (переважно з супутників LANDSAT та SPOT), отримано інформацію про просторово-часові зміни гідролого-радіоекологічної ситуації в районі

досліджень, зокрема на міждамбовій площі (між «старою» та «ноюю» лівобережними дамбами) та на ділянці північно-східніше від неї в межах Прип'ятської лівобережної осушувальної системи.

Після проведення у 2001-2015 рр. ряду гідротехнічних заходів та реалізації управлінських рішень стосовно форми експлуатації відповідного водоохоронного комплексу, на її території загалом встановлено незначне обводнення та заболочення. Це підтвердило радіоекологічну доцільність і обґрунтованість прийнятих рішень. Таким чином, ситуація, що склалася на той період, відображала відносно стабілізацію концентрації  $^{90}\text{Sr}$  у поверхневому стоці досліджуваного району ЧЗВ.

Подібна гідролого-радіоекологічна обстановка на території, що розглядається, спостерігалася до кінця 2022 р. Наприкінці цього ж року, на підставі адекватних результатів моніторингових досліджень з залученням новітніх матеріалів, отриманих із космічних апаратів WorldView-2 та Sentinel-2, прогнозувалося вірогідне настання багатоводної фази водності в рамках повного гідрологічного циклу, причому для басейну р. Прип'ять загалом [5, 10, 11]. Проте залишилося нез'ясованим, чи матимуть ці процеси продовження в найближчі роки, що визначає **не вирішену раніше частину загальної проблеми**. Зважаючи на вплив гідрометеорологічних факторів на режим водності поверхневих об'єктів, потребували уточнення й дані про кількість атмосферних опадів по вказаній території.

Отож, представлена робота є продовженням попередніх напрацювань у напрямі аналізу гідрологічної ситуації на території Прип'ятської лівобережної осушувальної системи ЧЗВ й оцінювання обсягів винесення за її межі радіонуклідів. У ній висвітлюються основні фактичні дані, що стали основою для міркувань про тенденції у зміні як гідрологічного циклу, так і радіаційно-екологічної ситуації в районі досліджень [4].

## Матеріали та методи досліджень

Для досягнення поставленого завдання у роботі застосовувалися багатоспектральні **космічні знімки**, що отримані протягом тривалого часового періоду (переважно у квітні-травні) із супутників WorldView-2 (від 26.05.2018 р. і 06.04.2022 р.) та Sentinel-2 (від 02.05.2023 р. і 09.04.2024 р.) та мають вихідну просторову розрізненість відповідно 0,5 і 10 м/пкл. Проте задля отримання порівнянних результатів за матеріалами знімання цих космічних апаратів просторова розрізненість зображень WorldView-2 насамперед цілеспрямовано була генералізована до 6 м/пкл.

Для вибірки, збору та накопичення даних стосовно **кількості атмосферних опадів**, що випадали на території досліджень, використані можливості платформи ERA5 [12]. Просторова розрізненість даних ERA5 по регіону досліджень – лівобережній частині водозбору басейну р. Прип'ять загальною площею 57 871 км<sup>2</sup> (рис. 1) – становить 11,132×11,132 км. Таким чином, на території робіт кількість опадів аналізувалася по 467 комірках площею 123,921 км<sup>2</sup> кожна. Ця частина водозбірного басейну Прип'яті майже повністю лежить в межах території Республіки Білорусь, що чітко відображає рисунок 1. На наведеному рисунку позначений контур, що окреслює багатокутний полігон – відповідну частину водозбірного басейну (так званий *shape-файл*). Таким чином комірки, що розташовані по його периметру, є неповними, так би

мовити “зрізаними” (неквадратними) пікселями. Отож, площа цього полігона є меншою за реальну площу вибору статистичних даних з опадів і становить 50 729 км<sup>2</sup>.

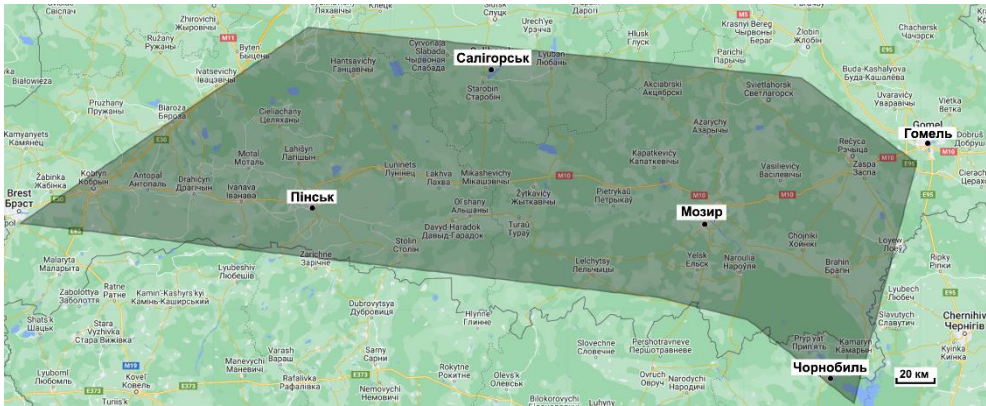


Рис. 1. Територія лівобережної частини водозбору басейну р. Прип’ять (багатокутний полігон темного відтінку кольору), статистичні дані стосовно атмосферних опадів на якій аналізувалися у дослідженнях

Порівняно з опрацьованими матеріалами щодо кількості атмосферних опадів, викладеними у публікаціях [4, 5, 10], під час виконання даних досліджень вони уточнені, оскільки й контур лівобережної частини водозбору басейну р. Прип’ять визначений коректніше.

У роботі застосовувалася **методика комп’ютерного оброблення космічних знімків** та аналізу одержаних результатів, що розроблена як попередніми дослідниками, так і авторами цієї публікації [1–3, 5, 8–10, 13, 14 та ін.]. Початково знімки було геометрично скориговано, виконана їх радіометрична корекція, географічна прив’язка.

Для чіткого виявлення за багатоспектральними супутниковими знімками відкритих водних поверхонь на фоні рослинності, відкритого ґрунту або інших відслонених осадових утворень використано **дані з нормалізованого різницевого водного індексу** (Normalized Difference Water Index – NDWI).

NDWI, відповідно до [13], розраховується за формулою (1):

$$NDWI = \frac{I_G - I_{NIR}}{I_G + I_{NIR}}, \quad (1)$$

де  $I_G$  – відбивна здатність об’єкта в зеленій (green – G) області спектра електромагнітних хвиль,  $I_{NIR}$  – відповідно у ближній інфрачервоній (near infrared – NIR) області спектра.

Територія лівобережної Прип’ятської осушувальної системи у межах ЧЗВ класифікувалася на *два основних класи*: відкрита водна поверхня і суходіл. До класу останнього, крім власне площ непокритого рослинністю ґрунту, піску, інших осадових утворень та задернованих, заліснених площ або ж таких, що зайняті різновидовим рослинним покривом різної щільності, також приналежні різноманітні техногенні об’єкти (бетонні, залізні, дерев’яні конструкції й споруди тощо).

Для вибірки статистичних даних щодо кількості атмосферних опадів з бази даних, доступ до якої надається *платформою ERA5* [12], саме для цієї території за конкретними географічними координатами та за попередньо визначеними місяцями та роками було створено програмний алгоритм та відповідну підпрограму (автор А.А. Андреев [4, 10, 11]). Певні роки визначалися роками отримання космічних знімків супутниковими системами, які залучені до дослідження. При цьому брався до уваги також кожен з років, що передував року знімання. Протягом кожного з років, дані за яким мали аналізуватися, визначалися групи місяців по два місяці в кожній групі.

Підпрограмою для взятої до розгляду території розраховувалося не середнє значення кількості атмосферних опадів по кожному з двох місяців, а їх сума за ці два місяці. Місяці було згруповано після проведення численних розрахункових ітерацій з їх комбінаціями від двох до чотирьох місяців у групі, з часовим зміщенням на 1-2 місяці таким чином, щоб встановити їх інформативність щодо формування відносної водності території досліджень.

Значення кількості атмосферних опадів визначалися у міліметрах, які умовно можна вважати прийнятними у метеорології міліметрами шару води, що випала. Адже, як зазначається у відповідному джерелі [12], з допомогою ERA5 отримується така інформація про опади: вони являють собою накопичену рідку і замерзлу воду, зокрема, воду дощів та снігу, що випадають на поверхню Землі. Загалом це сума масштабних опадів (*total precipitation*, тобто тих опадів, що генеруються масштабними погодними умовами, такими як області низького тиску та холодні фронти) та конвективних опадів (генеруються конвекцією, що виникає, коли повітря на нижніх рівнях атмосфери тепліше і менш щільне за повітря вгорі, тому воно і піднімається). Величина кількості опадів не включає туман, росу або опади, що випаровуються в атмосфері до того, як потраплять на поверхню Землі. Ця величина є накопичувальною в період від початку часу прогнозу до кінця кроку прогнозу.

### **Викладення основного матеріалу досліджень й обговорення одержаних наукових результатів**

На підставі аналізу матеріалів багатоспектральних космічних знімків отримано тематично нові адекватні результати, що стали інформативними у процесі оцінювання гідрологічної та радіоекологічної обстановки на території лівобережної Прип'ятської системи. Найперше – **встановлено розподіл** закартованих за даними космічних знімків **площ, що** в різні роки в межах кожної з виділених окремих ділянок деталізації були **зайняті водною поверхнею** або суходолом. Це ділянки між старою та новою дамбами (ділянка № 1) та ділянка на північний схід від старої дамби (ділянка № 2). Особливий інтерес являють новітні дані WorldView-2 від 06.04.2022 р. та Sentinel-2 від 02.05.2023 р. і 09.04.2024 р. (рис. 2, 3).

Раніше встановлені [2, 3, 5, 8, 9] за космічними знімками факти відносно незначного обводнення ділянки між старою та новою лівобережними дамбами, у 2018 р. мали чітку тенденцію до пролонгації, принаймні майже до середини весни 2022 р. Зокрема, помітно істотніше зменшення площі, що була покрита водною поверхнею в районі досліджень, виявлено за знімком з супутника *WorldView-2 від 06.04.2022 р.* Це очевидно з порівняння результатів,

отриманих унаслідок тематичного дешифрування даних з цього ж апарата від 26.05.2018 р. (табл. 1). Так, зайнята водною поверхнею площа на міждамбовій ділянці зменшилася до 1,93 км<sup>2</sup>, а на ділянці на північний схід від старої дамби – до 1,37 км<sup>2</sup>. У цей же час площа суходолу в їх межах становила 13,494 км<sup>2</sup> і 17,72 км<sup>2</sup> відповідно.

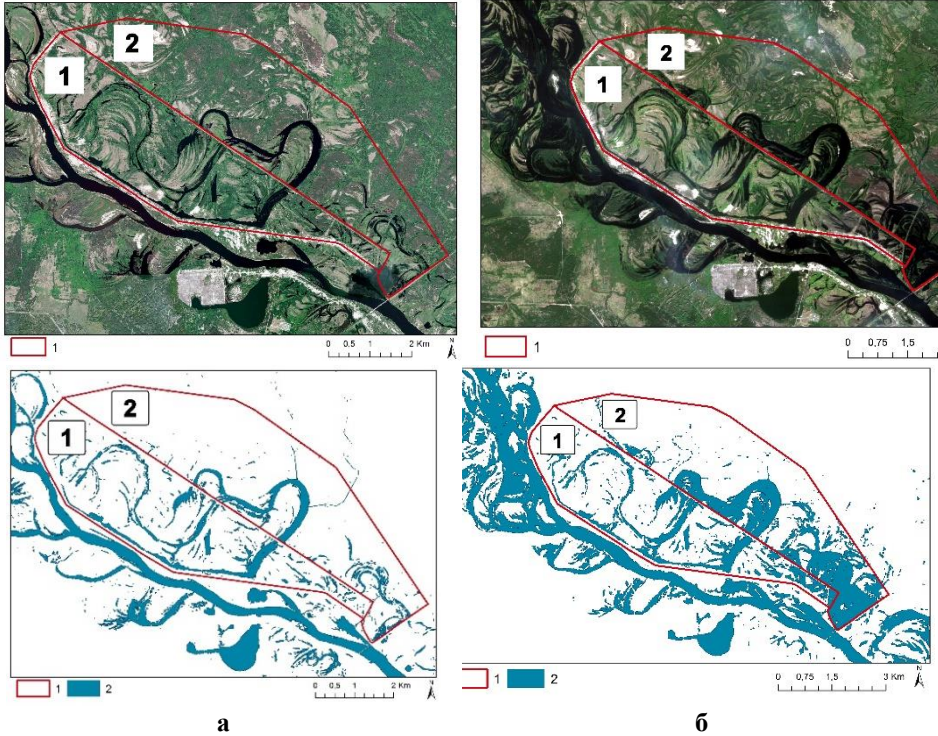


Рис. 2. Територія лівобережної Прип'ятської осушувальної системи. Космічні знімки (верхній ряд), що отримані з апаратів WorldView-2 від 06.04.2022 р. (а) і Sentinel-2 від 02.05.2023 р. (б) та побудовані на підставі їх застосування картосхеми водного дзеркала (нижній ряд) у межах міждамбової ділянки (1) та ділянки на північний схід від старої дамби (2). 1 – межі ділянок дослідження, 2 – площі, що зайняті відкритою водною поверхнею

Весняний водний баланс території формується за рахунок атмосферних опадів кінця попереднього року (протягом листопада-грудня) та початку поточного (січень-лютий-березень-квітень). У цей період температура атмосферного повітря низька, а його вологість підвищена, часто є наявність якогось снігового покриву, випаровування із земної поверхні незначне. Цим пояснюється зменшення зволоженості та площі водної поверхні на території досліджень навесні 2022 р., оскільки напередодні, у вересні-жовтні 2021 р., у межах лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять загальною площею 57 871 км<sup>2</sup> зафіксовано відносно малу кількість атмосферних опадів – близько 90 мм. Про це виразно свідчать опрацьовані нами статистичні дані, надані платформою ERA5 [12] (рис. 4).

Зважаючи на зазначені гідрометеорологічні фактори і факти, обґрунтованим, як ми вважаємо [4, 5, 10], є висновок про трансформацію гідрологічних умов як у межах території природно-техногенного комплексу



Прип'ятської осушувальної системи зокрема, так і лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять загалом. Імовірно, трансформація цих умов пов'язана з процесами глобальних змін клімату. У межах території досліджень ці зміни переважно проявляються потеплінням, з відносно підвищеними значеннями температур атмосферного повітря у холодний період року, а також перерозподілом кількості опадів поміж місяцями протягом року загалом, що призводить до їх зменшення навесні.

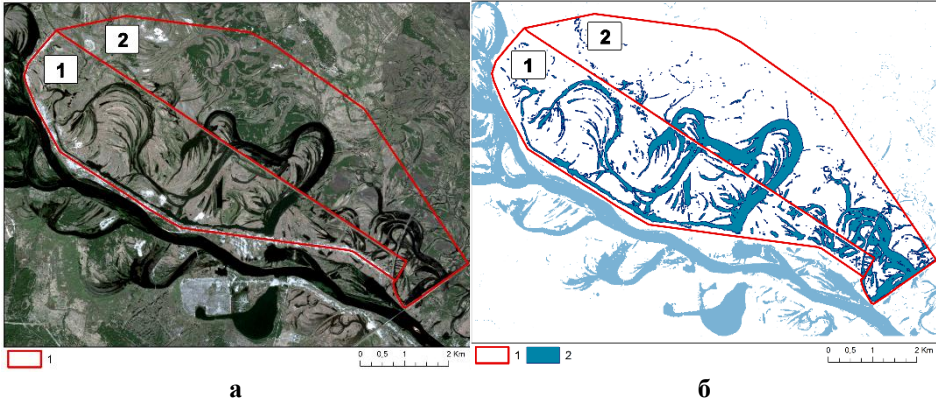


Рис. 3. Територія лівобережної Прип'ятської осушувальної системи. Космічний знімок, отриманий з супутника Sentinel-2 09.04.2024 р. (а), та створена на основі його застосування картосхема водної поверхні (б) у межах водозбору між старою і новою дамбами (1) та на ділянці північно-східніше старої дамби (2). 1, 2 – див. рис. 2

Таблиця 1. Площі відкритої водної поверхні та суходолу в межах окремих ділянок водозборів лівобережжя р. Прип'ять, що визначені за матеріалами супутникових знімків 2018, 2022, 2023 і 2024 рр.\*

Дата зйомки	Міждамбова ділянка (1)		Ділянка на північний схід від старої дамби (2)
	Площа водної поверхні, км <sup>2</sup>	Площа суходолу, км <sup>2</sup>	Площа водної поверхні, км <sup>2</sup>
26.05.2018 р.	5,414	10,01	3,64
06.04.2022 р.	1,93	13,494	1,37
02.05.2023 р.	3,379	12,045	1,536
09.04.2024 р.	3,279	11,97	3,385

\* Результати 2018 та 2022 рр. – за даними знімків з супутника WorldView-2, 2023 і 2024 рр. – з космічного апарата Sentinel-2.

Стосовно більшості території України фахівці-гідрометеорологи теж відзначають зростання суми опадів саме узимку [15]. Натомість у квітні й в літній сезон їх кількість зменшується. На думку авторів вказаної публікації, зміна кліматичних показників, таких як температура та опади, відбувається внаслідок зміни тенденції великомасштабної атмосферної циркуляції. Як ми зрозуміли з їхніх результатів, під “великомасштабними” процесами вони розуміють ті, що відбуваються на значних за охопленням площі територіях.

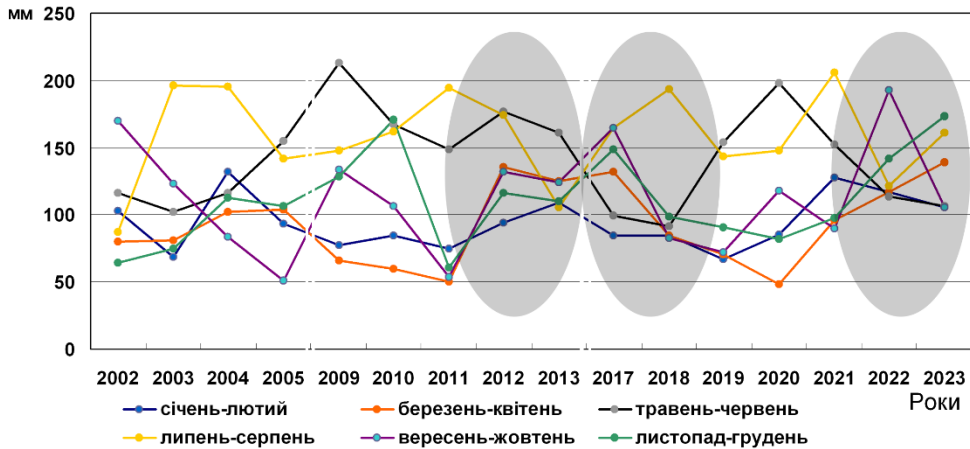


Рис. 4. Динаміка кількості атмосферних опадів у межах усієї території лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять за 2002-2005, 2009-2013, 2017-2023 рр. по місяцях, мм (складено з використанням даних платформи ERA5 [12]). Сірими овалами вказані етапи зростання ступеня обводнення території досліджень

На відміну від більшості попередніх років, дані космічного знімання супутником *Sentinel-2* від 02.05.2023 р. і 09.04.2024 р. засвідчують зростання обводнення території як міждамбової ділянки, так і району, що розташований північно-східніше старої дамби (див. табл. 1, рис. 2, 3). Зокрема, станом на **02.05.2023 р.** площа дзеркала води на міждамбовій ділянці становила 3,379 км<sup>2</sup>. У порівнянні з результатами досліджень за матеріалами WorldView-2 від 06.04.2022 р. площа відкритої водної поверхні збільшилася тут на 75%, натомість площа суходолу зменшилася приблизно на 11%. Певне, хоча й менш значне збільшення площі водної поверхні також відмічається в межах ділянки на північний схід від старої дамби: 1,536 км<sup>2</sup> станом на 02.05.2023 р. порівняно з 1,37 км<sup>2</sup> станом на 06.04.2022 р. Це є 12%-м зростанням від дати 06.04.2022 р.

На ділянці між старою і новою дамбами за матеріалами знімання з космічного апарата Sentinel-2 від **09.04.2024 р.** закартована приблизно така ж площа відкритої водної поверхні, що й станом на 02.05.2023 р.: 3,279 км<sup>2</sup>. Проте на ділянці північно-східніше старої дамби на початку квітня 2024 р. виявлено істотне, порівняно із станом на 06.04.2022 р., збільшення площі, що зайнята водою. На дату зйомки 09.04.2024 р. ця площа сягає значення 3,385 км<sup>2</sup> (див. табл. 1). Тобто показники початку квітня 2022 р. збільшилися в 1,47 раза.

Вважаємо, що результати дистанційних досліджень водних об'єктів за даними супутників WorldView-2 і Sentinel-2 є порівнянними. Адже просторова розрізненість знімків першого з них нами свідомо була генералізована до 6 м/пкл, а розрізненість зональних зображень другого становить 10 м/пкл.

Виявлені за допомогою космічних знімків факти зростання обводнення території сигналізують про імовірне формування багатоводної фази водності (11 років) у межах повного гідрологічного циклу (22 роки), що зазвичай історично був характерний для басейну р. Прип'ять. Такі цикли закінчуються маловодними фазами [16], одну з яких ми спостерігали протягом 2003-2022 рр. Причому тенденція у проходженні маловодної фази намічалася у 2021-2022 рр.



Ознака формування багатоводної фази, вірогідно, підкреслюється наданими платформою ERA5 [12] статистичними даними щодо відносного збільшення у період вересень-жовтень-листопад-грудень 2022 р. **сумарної кількості атмосферних опадів** у межах усєї території лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять (див. рис. 4). За сумою вони значно переважали відповідні показники 2021 р. та інших попередніх років. Так, у **2022 р.** кількість опадів у вересні-жовтні сягнула тут позначки майже 193 мм шару води, що випала, а в листопаді-грудні – 142 мм. Іншою чіткою ознакою настання багатоводної фази водності були рясні дощі, що пройшли в досліджуваному регіоні у квітні 2023 та 2024 рр., та затоплення, підтоплення значних площ, а також паводок на його території, зареєстрований у квітні-травні 2023 р.

Дані із сумарної кількості атмосферних опадів у межах лівобережної частини водозбору басейну р. Прип'ять за **2023 р.** продовжують визначати тренд їх зростання у холодний період року протягом листопада-грудня. Зокрема, за листопад-грудень цього року встановлено показник майже у 174 мм (див. рис. 4).

З даними стосовно масштабів затоплення й обводнення досліджених ділянок водозборів лівобережжя р. Прип'ять в межах меліоративної системи чітко, у прямій залежності корелюють дані щодо винесення з цієї території радіонукліда  $^{90}\text{Sr}$ . Відомо [3], що припинення постійної експлуатації ПНС на старій лівобережній дамбі у 2015 р. позбавило причин додаткового збільшення концентрації  $^{90}\text{Sr}$  у поверхневих водах верхнього б'єфу дамби. Адже за результатами моніторингових спостережень працівників Державного спеціалізованого підприємства (ДСП) «Екоцентр» [17] винесення цього радіонукліда зі стоком з лівобережного польдера у 2015 р. становило 0,006 ТБк, у 2016 р. – 0,02 ТБк (табл. 2, рис. 5). Це істотно менше у порівнянні з винесеною активністю  $^{90}\text{Sr}$  в одному з попередніх років: 0,65 ТБк у 2013 р.

Таблиця 2. Винесення  $^{90}\text{Sr}$  зі стоком з лівобережного польдера у межах ЧЗВ у 2009-2023 рр., ТБк (складено з використанням даних ДСП «Екоцентр» [17])

Роки							
2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Винесення							
0,24	0,27	0,34	0,21	0,65	0,08	0,006	0,02
Роки							
2017	2018	2019	2020	2021	2022*	2023*	
Винесення							
0,04	0,07	0,008	0,001	0,005	0,02	0,034	

\* Дані отримані розрахунковим методом з урахуванням результатів багаторічних спостережень.

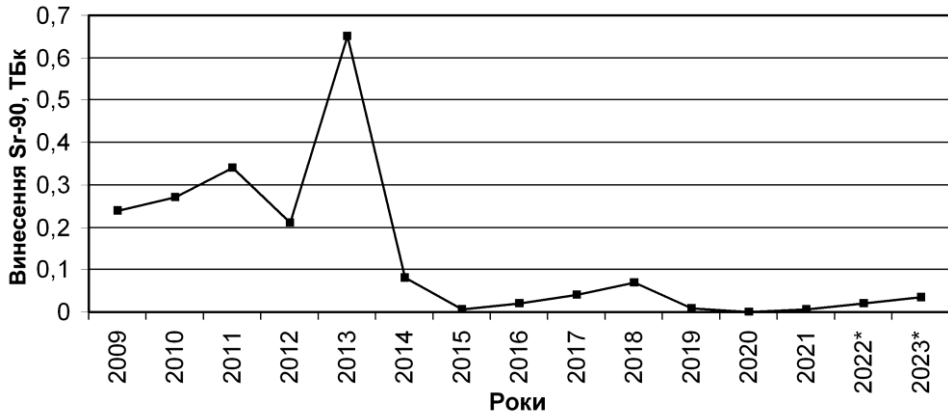


Рис. 5. Обсяги винесення  $^{90}\text{Sr}$  зі стоком із лівобережного польдера в межах ЧЗВ у 2009-2023 рр., ТБк. Побудовано за матеріалами моніторингових спостережень ДСП “Екоцентр” [17] (дані за 2022 і 2023 рр. отримані розрахунковим методом з урахуванням результатів багаторічних спостережень)

Натомість розрахункові обсяги активності  $^{90}\text{Sr}$ , які могли бути винесеними зі стоком з району лівобережного польдера у 2022 і 2023 рр., оцінені відповідно в 0,02 та 0,034 ТБк [17]), цілком узгоджуються із встановленою тенденцією їх зростання. Так, порівняно з 2021 р. у 2023 р. це винесення зросло у 6,4 рази, а порівняно з 2020 р. – у 34 рази (!).

Таким чином, простежується пряма залежність між винесеними з території лівобережного польдера до р. Прип’ять обсягами активності  $^{90}\text{Sr}$  та значеннями закартованих засобами дистанційних технологій площ відкритої водної поверхні в її межах. Зростання останніх, що є логічним, добре корелює з відносно підвищеними значеннями сумарної кількості атмосферних опадів у холодний період року протягом вересня-жовтня-листопада-грудня у межах усієї території лівобережної частини водозбірної басейну р. Прип’ять.

### Впровадження науково-технічних результатів роботи

За результатами роботи напрацьовано «**Науково-методичну рекомендацію** із застосування геоінформаційного аналізу комплексу дистанційних і наземних даних з метою оцінювання пов’язаних із кліматичними змінами трансформацій гідрологічних умов, що впливають на радіоекологічний стан у водно-болотних екосистемах на територіях, у межах яких постійні моніторингові спостереження за водним стоком не здійснюються». Матеріали рекомендації є актуальними для території ЧЗВ, де наразі в умовах певною мірою хаотичної замінованості внаслідок російської окупації відповідні моніторингові спостереження на більшості об’єктів на регулярній основі об’єктивно не проводяться. Зважаючи на ситуацію, що склалася, матеріали рекомендації передано для використання в діяльності групи моніторингу приземного шару повітря та ландшафтів інформаційного науково-аналітичного відділу ДСП “Екоцентр” (Акт впровадження – приймання-передачі матеріалів науково-дослідних розробок від 15.06.2023 р.). Вони використовувалися з метою оцінки обсягів виносу радіонуклідів з басейнів

водного стоку в межах ЧЗВ до р. Прип'ять, а також з метою оцінки пожежної небезпеки та вжиття протипожежних заходів на відповідних територіях протягом 2023 р.

Зроблений у рекомендації прогноз, що поточна гідрологічна ситуація призведе у 2023 р., порівняно з попередніми роками, до зростання обсягів винесення активності  $^{90}\text{Sr}$  зі стоком з району лівобережного польдера, у подальшому підтвердився на підставі розрахунків фахівців ДСП "Екоцентр" [17] (див. табл. 2, рис. 5).

## **Висновки та перспективи подальших робіт**

Порівняно з періодом безперервної роботи ПНС у межах лівобережного водоохоронного комплексу ЧЗВ, що закінчився у 2015 р., за даними космічних знімків 2018 і 2022 рр. на цій території встановлено незначне обводнення та заболочення ділянки між старою та новою дамбами, а також ділянки північно-східніше старої дамби [2, 4, 5, 9, 10]. Це може свідчити про трансформацію гідрологічних умов у межах території природно-техногенного комплексу Прип'ятської осушувальної системи, що пов'язані з процесами глобальних змін клімату (переважно глобального потепління з тенденцією до перерозподілу кількості атмосферних опадів поміж місяцями протягом року, що призводить до їх зменшення у весняний період).

Разом з цим аналітичні дані супутникових знімків 2023 і 2024 рр. дають можливість прогнозувати цілком вірогідне настання багатоводної фази водності в рамках повного гідрологічного циклу [4, 5, 10, 11]. Про це свідчать отримані на їх підставі результати, за якими в межах ЧЗВ встановлено зростання обводнення території лівобережної Прип'ятської системи, а також статистичні дані щодо сумарної кількості атмосферних опадів у холодний період року на території лівобережної частини водозбірного басейну р. Прип'ять.

Оскільки прогноз, що така гідрологічна ситуація у перспективі призведе до зростання обсягів винесення  $^{90}\text{Sr}$  зі стоком з району лівобережного польдера у 2023 р., підтвердився на підставі розрахунків фахівців ДСП "Екоцентр" [17], нами передбачається [4, 5, 10, 11] подальше погіршення радіоекологічної обстановки на території досліджень. Принаймні збереження такої тенденції цілком імовірно у 2024-2026 рр.

Отже, технології космічного геомоніторингу є складовими інформаційно-технологічної системи для оцінювання радіаційно-екологічної обстановки в межах важкодоступних, заболочених, значною мірою забруднених радіоактивними випадіннями та замінованих внаслідок окупації воєнізованими угрупованнями територій, у межах яких безпосереднє перебування персоналу повинно бути вкрай обмеженим.

***Перспективи подальших досліджень*** різноманітних гідрологічних процесів та радіоекологічної обстановки на лівобережжі р. Прип'ять з метою значного зменшення або уникнення опромінення персоналу при проведенні відповідних польових робіт, а також унеможливлення його поранень, каліцтва чи навіть загибелі на залишених регулярними військами російської федерації боєприпасах (зокрема, мінах) під час окупації ЧЗВ у 2022 р. полягають, на нашу думку [5], у такому. А саме: у майбутніх роботах рекомендується використання даних космічного знімання високої просторової, спектральної й

радіометричної розрізненості. Зйомка повинна виконуватися з порівняно невеликим часовим інтервалом: у період повеней – щотижня, в інший час – принаймні раз на 1-3 місяці. Застосування технологій безпілотних літальних апаратів у ході досліджень (гіперспектральне знімання по достатній кількості профілів і точок спостережень, або ж площове знімання з просторовою розрізненістю сучасних сенсорів близько 2 см/пкл) й активне використання отриманих матеріалів спільно з наземними і супутниковими даними надасть якісно новий поштовх у вивченні радіогідрологічного й радіоекологічного стану території ЧЗВ.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розрахунок водно-радіаційного балансу осушувальних систем лівобережної заплави р. Прип'ять в 30-км зоні ЧАЕС: звіт про НДР; наук. керівник В.М. Шестопапов. (1998). Київ: НІЦ РІД НАН України. Т. 1. 213 с.
2. Азімов О.Т., Шевченко О.Л., Томченко О.В. (2022). Геоінформаційний аналіз даних космічних знімачь з метою оцінювання змін радіогідрологічних умов територій. Укр. журн. дистанційного зондування Землі. Т. 9, № 2. С. 13–36. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.2.21>
3. Радіогідрогеохімія водозбірних басейнів Чорнобильської зони відчуження: наук. монограф.; за ред. О.Л. Шевченка, В.В. Доліна. (2023). Київ: Наук. думка. 348 с. ISBN 978-966-00-1855-6. <http://doi.org/10.15407/978-966-00-1855-6>
4. Азімов О.Т., Андреев А.А., Кіреєв С.І., Томченко О.В., Триснюк В.М. (2024). Космічний моніторинг природних і техногенних подій на Прип'ятській лівобережній меліоративній системі Зони відчуження. Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері цивільного захисту та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України: зб. наук. пр. Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 28-30 трав. 2024 р.). Київ: НУХТ. С. 52–60. ISBN 978-966-612-335-3. <https://drive.google.com/drive/folders/16iY1fsW43jiO5zdgXhZ2U1se9dMYCVw2>
5. Азімов О.Т., Томченко О.В., Шевченко О.Л., Кіреєв С.І. (2024). Моніторинг гідроресурсів радіаційно забруднених осушувальних систем за комплексом даних космічних знімачь і наземних спостережень (у контексті регіональних змін клімату). Космічна наука і технологія. Т. 30, № 2. С. 69–92. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.069>
6. Положення про Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник. (Затверджено Наказом Міністерства екології та природних ресурсів України 03.02.2017 р. № 43). <https://zapovidnyk.org.ua/index.php?fn=3t&n=160250636283>
7. Рекомендації Всеукраїнської науково-практичної конференції «Рациональне використання водних ресурсів як фактор забезпечення національної безпеки України». (2012). Матеріали VII Пленуму Спілки економістів України та Всеукр. наук.-практ. конф. (вересень 2012 р.). Київ: Спілка економістів України. С. 260–275. Режим доступу: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://seu.org.ua/wp-content/uploads/2013/12/voda.pdf>
8. Нові методи в аерокосмічному землезнавстві: метод. посіб. по темат. інтерпретації матеріалів аерокосмічних зйомок; відп. ред. В.І. Лялько. (1999). Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України. 264 с. ISBN 966-02-1398-0
9. Azimov O., Tomchenko O., Shevchenko O., Dorofey Ye. (2022). Satellite monitoring of the natural and technogenic events on the left-bank Pripjat reclamation system of the Chornobyl Exclusion Zone. Proc. 16th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine). 6 p. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580102>

10. Azimov O.T., Tomchenko O.V., Andreiev A.A., Dorofey Ye.M., Shevchenko O.L., Kireev S.I. (2023). Monitoring of the current underflooding processes of drainage systems in the Exclusion Zone by means of remote sensing and GIS-technologies. Proc. 17th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (7-10 November 2023, Kyiv, Ukraine). 5 p. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520129>
11. Азімов О.Т., Томченко О.В., Шевченко О.Л., Триснюк В.М., Андреев А.А., Кіреєв С.І. (2023). Аналіз процесів підтоплень в межах Зони відчуження на підставі застосування ДЗЗ/ГІС-технологій / Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення: колективна монограф. за матеріалами 22-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток» (Київ, 14-15 листоп. 2023 р.); за заг. ред. С.О. Довгого. Київ: ТОВ «Вид-во «Юстон». С. 202–205. DOI: 10.37321. [https://itgip.org/wp-content/uploads/2023/11/1\\_zbirka\\_08\\_11\\_23-1-1.pdf](https://itgip.org/wp-content/uploads/2023/11/1_zbirka_08_11_23-1-1.pdf)
12. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
13. McFeeters S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.* Vol. 17, iss. 7. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
14. Довгий С.О., Лялько В.І., Трофимчук О.М., Федоровський О.Д., Азімов О.Т., Верюжський Г.Ю., Вульфсон Л.Д., Греков Л.Д., Кононов В.І., Копійка О.В., Костюченко Ю.В., Крот В.М., Ловцов І.В., Перерва В.М., Прусов В.А., Рябоконеко О.Д., Савицький О.А., Сахацький О.І., Терьоменко О.М., Ходоровський А.Я., Яценко О.В. (2001). Інформатизація аерокосмічного землезнавства; за ред. С.О. Довгого і В.І. Лялька. Київ: Наук. думка. 607 с. ISBN 966-00-0743-4
15. Мартазінова В.Ф., Городецька Н.С., Рибченко Л.С., Савчук С.В., Гребенюк Н.П., Татарчук О.Г. (2022). Особливості температурно-вологісного режиму території України з початку ХХІ сторіччя під впливом змін великомасштабної атмосферної циркуляції. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля.* № 2 (2). С. 22–34. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2022.02>
16. Ободовський Ю.О., Хільчевський В.К., Ободовський О.Г. (2018). Гідроморфоекологічна оцінка руслових процесів річок верхньої частини басейну Тиси (в межах України): монографія; за ред. О.Г. Ободовського. Київ: Прінт-сервіс. 193 с. ISBN 978-617-7069-71-4
17. Інформаційний звіт про результати радіаційно-екологічного моніторингу зони відчуження за 2023 рік. (2024). Чорнобиль: ДСП “Екоцентр”. 30 с.

*Стаття надійшла до редакції 03.09.2024 і прийнята до друку після рецензування 09.12.2024*

## REFERENCES

1. Calculation of the water-radiation balance of reclamative systems of the Left-bank flood plain of the Prypiat River in 30-km Zone of the ChNPP: Report on research (vol. 1). (1998). Kyiv: Radioecological Center, NAS of Ukraine [in Ukrainian].
2. Azimov, O.T., Shevchenko, O.L., & Tomchenko, O.V. (2022). Geoinformation analysis of the satellite imagery data in order to assess the changes in radiohydrological conditions over the study territories. *Ukrainian J. Remote Sens.*, 9 (2), 13-36. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.2.213> [in Ukrainian with English abstract].
3. Radiohydrogeochemistry of catchment areas of the Chernobyl Exclusion Zone: Sci. monograph. (2023). O.L., Shevchenko, & V.V., Dolin (Eds.). Kyiv: Naukova Dumka. ISBN 978-966-00-1855-6. <http://doi.org/10.15407/978-966-00-1855-6> [in Ukrainian with English abstract].

4. Azimov, O.T., Andreiev, A.A., Kireev, S.I., Tomchenko, O.V., & Trysniuk, V.M. (2024). Satellite monitoring of the natural and technogenic events within the Prypiat Left-Bank Reclamation System of the Exclusion Zone. In: *Current problems and innovative technologies in the field of civil protection and environmental security for the post-war recovery of Ukraine: Sci. Proc. Int. Sci. and Practical Conf. (28-30 May 2024, Kyiv)*. Kyiv: Nat. Univ. Food Tech. Press (pp. 52-60). ISBN 978-966-612-335-3. Retrieved from <https://drive.google.com/drive/folders/16iY1fsW43jiO5zdgXhZ2U1se9dMYCVw2> [in Ukrainian with English summary].
5. Azimov, O.T., Tomchenko, O.V., Shevchenko, O.L., & Kireev, S.I. (2024). Water resource monitoring for the drainage systems contaminated by radiation based on the complex of satellite imaging and ground observations (in the context of regional climate changes). *Space Sci. Tech. (Ukraine)*, 30 (2), 69-92. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.069> [in Ukrainian with English abstract].
6. Regulations on Chernobyl Radiation and Ecological Biosphere Reserve. (Approved by Order of Ministry of Environmental Protection and Natural Resources on February 3, 2017, No. 43). Retrieved from <https://zapovidnyk.org.ua/index.php?fn=3t&n=160250636283> [in Ukrainian].
7. Recommendations of All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Rational Utilization of Water Resources as a Factor of National Security Protection”. (2012). In *Proc. 7-th Plenum of Society of Economists of Ukraine and All-Ukrainian Sci. and Practical Conf. (September, 2012)* (pp. 260-275). Kyiv: Society of Economists of Ukraine. Retrieved from <chrome-extension://efaidnbmnnnibpajpcgleclefindmkaj/https://seu.org.ua/wp-content/uploads/2013/12/voda.pdf> [in Ukrainian].
8. New methods in the aerospace Earth exploration: Sci. and learning guide. (1999). V.I., Lyalko (Ed.). Kyiv: CASRE IGS NAS of Ukraine. ISBN 966-02-1398-0 [in Ukrainian].
9. Azimov, O., Tomchenko, O., Shevchenko, O., & Dorofey, Ye. (2022). Satellite monitoring of the natural and technogenic events on the left-bank Pripjat reclamation system of the Chernobyl Exclusion Zone. In *Proc. 16th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine)* (pp. 1-6). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580102>
10. Azimov, O.T., Tomchenko, O.V., Andreiev, A.A., Dorofey, Ye.M., Shevchenko, O.L., & Kireev, S.I. (2023). Monitoring of the current underflooding processes of drainage systems in the Exclusion Zone by means of remote sensing and GIS-technologies. In *Proc. 17th Int. Sci. Conf. on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (7-10 November 2023, Kyiv, Ukraine)*, (pp. 1-5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520129>
11. Azimov, O.T., Tomchenko, O.V., Shevchenko, O.L., Trysniuk V.M., Andreiev, A.A., & Kireev, S.I. (2023). Analysis of underflooding processes within the Exclusion Zone on basis of RSE/GIS-technologies. In: S.O. Dovhyi (Ed.), *Information and Communication Technologies for Victory and Restoration: Multi-authored monograph based on the 22nd Int. Sci. and Practical Conf. on Information and Communication Technologies and Sustainable Development (14-15 November 2023, Kyiv, Ukraine)* (pp. 202-205). Kyiv: LLC Yuston Press. DOI: 10.37321. Retrieved from [https://itgip.org/wp-content/uploads/2023/11/1\\_zbirka\\_08\\_11\\_23-1-1.pdf](https://itgip.org/wp-content/uploads/2023/11/1_zbirka_08_11_23-1-1.pdf) [in Ukrainian].
12. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
13. McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.*, 17 (7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
14. Dovhyi, S.O., Lyalko, V.I., Trofymchuk, O.M., Fedorovsky, O.D., Azimov, O.T., Veriuzhskiy, G.Yu., Vulfson, L.D., Grekov, L.D., Kononov, V.I., Kopyika, O.V., Kostyuchenko, Yu.V., Krot, V.M., Lovtsov, I.V., Pererva, V.M., Prusov, V.A., Riabokonenko, O.D., Savytskyi, O.A., Sakhatsky, O.I., Teremenko, O.M., Khodorovsky, A.Ya., & Yatsenko, O.V. (2001). *Informatisation of aerospace Earth science.* (S.O. Dovhyi & V.I. Lyalko, Eds.). Kyiv: Naukova Dumka. ISBN 966-00-0743-4 [in Ukrainian].

15. Martazinova, V.F., Horodetska, N.S., Rybchenko, L.S., Savchuk, S.V., Hrebenuk, N.P., & Tatarчук, O.H. (2022). Features of the current state of the temperature-humidity regime of Ukraine since the beginning of the XXI century under the influence of changes of large-scale atmospheric circulation. *Meteorol., Hydrol., Environ. Monit. (Ukraine)*, 2 (2), 22-34. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2022.02> [in Ukrainian with English abstract].
16. Obodovskyi, Y.O., Khilchevskyi, V.K., & Obodovskyi, O.G. (2018). Hydromorphoecological assessment of the river bed processes of rivers in the upper Tisza river basin (within Ukraine): Monograph. (O.G. Obodovskyi, Ed.). Kyiv: Print-Service. ISBN 978-617-7069-71-4 [in Ukrainian with English abstract].
17. Information Report on the results of radiation and environmental monitoring of the Exclusion Zone for 2023. (2024). Chernobyl: SSE Ecocentre [in Ukrainian].

*The article was received 03.09.2024 and was accepted after revision 09.12.2024*

**Азімов Олександр Тельманович**

доктор геологічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України»

**Адреса робоча:** 01054 Україна, м. Київ, вул. О. Гончара, 55-6

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5210-3920> **e-mail:** [azimov@casre.kiev.ua](mailto:azimov@casre.kiev.ua)

**Триснюк Василь Миколайович**

доктор технічних наук, професор, завідувач відділу Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** [trysnyuk@ukr.net](mailto:trysnyuk@ukr.net)

**Шевченко Олексій Леонідович**

доктор геологічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Українського гідрометеорологічного інституту Державної служби України з надзвичайних ситуацій та НАН України, Київ, Україна

**Адреса робоча:** 03028 Україна, м. Київ, пр-т Науки, 37

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5791-5354> **e-mail:** [shevch62@gmail.com](mailto:shevch62@gmail.com)

**Томченко Ольга Володимирівна**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України»

**Адреса робоча:** 01054 Україна, м. Київ, вул. О. Гончара, 55-6

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6975-9099> **e-mail:** [tomch@i.ua](mailto:tomch@i.ua)

**Андрєєв Артем Андрійович**

доктор філософії, молодший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України»

**Адреса робоча:** 01054 Україна, м. Київ, вул. О. Гончара, 55-6

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6485-449X> **e-mail:** [artem.a.andreev@gmail.com](mailto:artem.a.andreev@gmail.com)

**Кірсєв Сергій Іванович**

генеральний директор Державного спеціалізованого підприємства “Екоцентр”

**Адреса робоча:** 07270 Україна, Київська обл., м. Чорнобиль, вул. Шкільна, 6

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7059-3655> **e-mail:** [kireev@ecocentre.kiev.ua](mailto:kireev@ecocentre.kiev.ua)

УДК 355. 004.6

**Oleksandr Trofymchuk**, Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of NASU, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** [trofymchuk@nas.gov.ua](mailto:trofymchuk@nas.gov.ua)

**Serhyi Zabolotnyi**, PhD student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-1381-0510> **e-mail:** [s.zabolotnyi@ed.nuou.org.ua](mailto:s.zabolotnyi@ed.nuou.org.ua)

**Vitaliy Katsalap**, PhD, D.Sc. candidate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4804-8022> **e-mail:** [v.katsalap@ed.nuou.org.ua](mailto:v.katsalap@ed.nuou.org.ua)

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

## IMPROVEMENT OF THE METHOD OF SEMIOTIC ANALYSIS OF MATERIALS FOR DETECTION OF INFORMATIONAL-PSYCHOLOGICAL IMPACT

**Abstract.** *The improvement of the method of semiotic analysis is carried out in the interests of identifying the informational and psychological impact on target audiences. This is due to the fact that there is a discrepancy in the way of determining the dominant messages in the information space. The main narratives used to justify armed aggression, in particular the theorization of the “SVO”, are characterized, demonization of Ukraine and the West, as well as the creation of the image of Russia as a victim of an international conspiracy. The essence of the integration of textual and visual elements in propaganda materials to form an emotional informational and psychological impact on young people, who are the main target audience, is explained.*

*The purpose of the article is to improve the method of semiotic analysis to identify informational and psychological impact by taking into account the hypothesis of information management, which will allow to increase the capabilities of the Ukrainian defense forces in countering information threats in the deoccupied territories of Ukraine.*

*The conducted research allowed us to outline the main areas of work in the information space in the deoccupied territories of Ukraine and develop information technology to effectively counter Russian propaganda. During a comprehensive analysis of methods of informational and psychological influence on specific target audiences, the content of narrative elements that determine their behavior was obtained. New approaches to the use of informational and psychological operations tools were analyzed, which allows for a deeper understanding of their role in manipulating public consciousness and ensuring ideological influence in the long term. The result of the study is a description and decomposition of the method of semiotic analysis for identifying informational and psychological influence on specific target audiences with a step-by-step analysis of specific manipulations. This expands the theoretical understanding of the use of materials as tools of informational and psychological influence, contributing to a deeper analysis of Russia's propaganda strategies in the education system.*

**Keywords:** *method of semiotic analysis; informational and psychological impact; propaganda; target audience; hypothesis; controlling information; information space; destructive information.*



О.М. Трофимчук, С.В. Заболотний, В.О. Кацалап

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

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ СЕМІОТИЧНОГО АНАЛІЗУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО- ПСИХОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ

***Анотація.** Удосконалення методу семіотичного аналізу здійснюється в інтересах виявлення інформаційно-психологічного впливу на цільові аудиторії. Це пов'язано з тим, що існує невідповідність шляхом визначення домінуючих повідомлень в інформаційному просторі. Охарактеризовані основні наративи, що використовуються для виправдання збройної агресії, зокрема героїзація "СВО", демонізація України та Заходу, а також створення образу росії як жертви міжнародної змови. Пояснено суть інтеграції текстових і візуальних елементів у пропагандистських матеріалах для формування емоційного інформаційно-психологічного впливу на молодь, яка є основною цільовою аудиторією.*

*Метою статті є удосконалення методу семіотичного аналізу для виявлення інформаційно-психологічного впливу шляхом врахування гіпотези на управління інформацією, що дозволить підвищити спроможності сил оборони України у протидії інформаційним загрозам на деокупованих територіях України.*

*Проведене дослідження дозволило окреслити основні напрями роботи в інформаційному просторі на деокупованих територіях України та розробити інформаційну технологію для ефективної протидії російській пропаганді.*

*Під час комплексного аналізу методів інформаційно-психологічного впливу на визначені цільові аудиторії отримано зміст наративних елементів, які встановлюють її поведінку. Проаналізовано нові підходи до використання інструментів інформаційно-психологічних операцій, що дозволяє глибше зрозуміти їхню роль у маніпуляції суспільною свідомістю та забезпеченні ідеологічного впливу в довгостроковій перспективі.*

*Результатом дослідження є опис та декомпозиція методу семіотичного аналізу для виявлення інформаційно-психологічного впливу на визначені цільові аудиторії із поетапним аналізом конкретних маніпуляцій. Це розширює теоретичне розуміння використання матеріалів як інструментів інформаційно-психологічного впливу, сприяючи глибшому аналізу пропагандистських стратегій росії у системі освіти.*

*Тому наведене удосконалення методу семіотичного аналізу для виявлення інформаційно-психологічного впливу в умовах сучасного протистояння фейкам і дезінформації є необхідним інструментом оцінювання інформаційного простору.*

*Впровадження удосконаленого методу семіотичного аналізу для виявлення інформаційно-психологічного впливу доцільно почати з окремих функціональних областей.*

**Ключові слова:** метод семіотичного аналізу; інформаційно-психологічний вплив; пропаганда; цільова аудиторія; гіпотеза; управляюча інформація; інформаційний простір; деструктивна інформація.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.111-124>

## Вступ

**Постановка проблеми.** В умовах широкомасштабної збройної агресії російської федерації інформаційний простір стає ключовою ареною для впливу на свідомість і поведінку цільових аудиторій. Одним із потужних інструментів інформаційно-психологічного впливу є система освіти, через яку держави можуть формувати довгострокові ідеологічні установки у молоді. Російська федерація активно використовує шкільну літературу, зокрема підручники з історії, для закріплення пропагандистських меседжів, спрямованих на виправдання збройної агресії, формування лояльності до державної політики та підготовку майбутніх поколінь до підтримки режиму.

Особливо гостро ця проблема постає на тимчасово окупованих територіях України, де система освіти використовується для русифікації населення, деукраїнізації та знищення національної ідентичності. Російські підручники містять чітко структурований пропагандистський меседж-бокс, що викривляє історичні події, героїзує збройну агресію росії, дискредитують Україну та Захід. Вони є інструментами систематичної маніпуляції свідомістю школярів, які перебувають у середовищі ізольованого інформаційного доступу.

Недостатнє розуміння механізмів цього впливу ускладнює розробку рекомендацій протидії та реабілітації постраждалого населення на деокупованих територіях. Відсутність комплексного підходу до аналізу таких освітніх матеріалів обмежує здатність виявити ключові пропагандистські інструменти, а також розробити ефективні освітні та інформаційні заходи для нейтралізації негативного впливу російської пропаганди. У цьому контексті постає необхідність дослідження методів, меседжів і наслідків використання пропагандистських елементів у шкільній навчальній літературі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз джерел [1-2] показує, що деструктивна інформація в інформаційному просторі перетворилась на алгоритм дій. Оцінювання цього алгоритму залежить від інформаційних технологій, які використовуються для створення комунікації між суб'єктом та об'єктом інформаційно-психологічного впливу. За такої обставини важливою особливістю є врахування поведінки певної цільової аудиторії під час визначення умов надання нею переваг до конкретної інформації в певному сегменті інформаційного простору.

У дослідженнях [3-4] окреслено теоретичну рамку потенційних можливостей інформаційно-психологічного впливу на цільові аудиторії через навчальну літературу в сфері освіти. В дослідженні [4] частково охарактеризовуються пропагандистські лінії переконання в навчальній літературі росії для старших класів.

В статтях [5, 6] зазначається, що пропагандистський вплив на молодь через шкільну літературу є частиною більшої системи пропагандистського впливу кремля.

В матеріалах статей [7-9] зазначено, що саме предмет «історія» найбільш перспективний для імплементації нарративної складової пропаганди кремля.

В [9] частково розкрито аспекти трансформації системи освіти на тимчасово окупованих територіях України.

У виданнях [11-13] описано подальші перспективи посилення інформаційно-психологічного впливу в системі освіти росії.

**Метою статті** є удосконалення методу семіотичного аналізу для виявлення інформаційно-психологічного впливу шляхом врахування гіпотези на управління інформацією, що дозволить підвищити спроможності сил оборони України у протидії інформаційним загрозам на деокупованих територіях України.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Від початку збройної агресії російської федерації проти України та тимчасової окупації нею частини української території, як за час проведення антитерористичної операції, так і в ході ведення операції об'єднаних сил на тимчасово окупованій території Донецької та Луганської областей створились умови, коли держава-агресор цілеспрямовано застосовує не тільки збройні формування російської федерації, а ще й комплекс сучасних прихованих та невійськових методів протидії, зокрема широкомасштабний деструктивний інформаційно-психологічний та агітаційно-пропагандистський вплив на населення України, як на Сході нашої держави, так і на решті її території.

Аналіз наведених подій дозволяє виділити три категорії обміну інформацією між суб'єктами впливу:

- управляючі інформаційні впливи;
- передавання інформації – опосередковані впливи;
- повідомлення про події – суперечливі впливи.

Під обміном інформацією між суб'єктами впливу розуміємо двосторонню взаємодію, у якій сторони виконують функції ініціатора або відповідача для кожного одиничного акту обміну.

Ініціатор формує керуючу взаємодію, тобто видає запит на визначену функцію управління. Відповідач формує відповідь на керуючий запит.

Реакція на передану інформацію реалізовується у запитах на визначену інформацію, яка видається ініціатором, та у відповідях, що формуються відповідачем. Повідомлення про події формуються та надсилаються ініціатором. Якщо існує необхідність у підтвердженні про прийом такого повідомлення, то воно формується відповідачем у вигляді відповіді.

Доцільно виділити три категорії управляючих інформаційних впливів:

- управління рівнем аналізу;
- управління рівнем систематизації;
- управління рівнем взаємодії.

Управління рівнем аналізу забезпечує механізми контролю керуючих впливів та координації усіх інформаційних ресурсів, які здійснюють управління повідомленнями від одного або декількох об'єктів інформаційного впливу. Управління рівнем аналізу є єдиним засобом, який забезпечує управління сукупністю можливих чинників безпосереднього інформаційного впливу на декілька цільових аудиторій.

Управління рівнем систематизації забезпечує механізми розподілу інформаційних ресурсів із  $N$  – категорій управляючих впливів. Кожна із  $N$  – категорій управляючих впливів може впливати на сукупність елементів між суб'єктами інформаційного впливу, коли не конкретизована цільова аудиторія.

Об'єкти  $N$  – категорій взаємодіють один з одним і забезпечують керуючі інформаційні впливи на кожен із  $N$  – категорій управляючих впливів, що використовуються для передачі даних між відповідними ініціаторами та акторами. Для передачі даних з метою управління  $N$  – категоріями інформаційних впливів використовується деструктивна інформація повторного суперечливого сприйняття.

Управління рівнем взаємодії забезпечує сукупність засобів керуючих впливів та управління одним суб'єктом деструктивного інформаційного впливу на визначену конкретну цільову аудиторію.

Для ефективної реалізації розглянутих категорій управляючих впливів необхідно визначити один з основних показників якості інформаційно-психологічного впливу, яким є інтенсивність інформаційних потоків.

Інтенсивність інформаційних потоків залежить від величини перепаду інтелектуальних потенціалів конкретної цільової аудиторії або конкретного соціуму. Інтенсивність інформаційних потоків також може залежати від внутрішніх та зовнішніх взаємозв'язків – ділового спілкування, інтелектуального обміну між людьми та групами, а також від можливостей мобілізувати інформаційні ресурси, концентрувати їх в потрібному напрямку.

Для підтримання управління інформаційно-психологічним впливом як сукупності усіх можливих впливів на цільову аудиторію створюється ситуація, коли буде недостатньо використання засобів управляючих впливів.

Якщо такої повноти немає – відсутня підтримка від передавання інформації (опосередкованого впливу) та повідомлення про події (суперечливі впливи), то функціональна повнота управління цільовими аудиторіями буде забезпечена відкритою поведінкою людей у соціумі в межах однієї цільової аудиторії.

У контексті розгляду активних інформаційно-психологічних впливів актуальним є питання не тільки опису процесу деструктивної його складової, а й інформаційної протидії. Це, у свою чергу, дозволить якісно вивчити характер процесів, які розглядаються, а також дає можливість ставити та вирішувати завдання щодо знаходження оптимальних способів їх організації.

У загальному вигляді зазначені процеси є нелінійними і тому допускають неочевидні шляхи їх розвитку. Разом з тим, навіть у найпростіших випадках аналіз математичних моделей та результатів розрахунків дає змогу визначати ключові характеристики, управління якими стимулюватиме напрямок розвитку ситуації у необхідному напрямку.

Інформаційний простір швидко еволюціонує, постійно навчається разом з людиною і вже може прогнозувати поведінку соціальних груп та краще розуміти людину та її інтереси. Соціальним мережам відомо про людину та соціальні групи абсолютно все, це надпотужний інструмент для розповсюдження дезінформації, саме тому, що за їхньою допомогою можна швидше зрозуміти інтереси, страхи та мотивації у поведінці цільової аудиторії та надати об'єкту саме ту інформацію, що здійснить безпосередній вплив на рішення будь-якого суб'єкту.

Для глибшого розуміння методів інформаційно-психологічного впливу, закладених у розділ російського підручника з історії, що присвячений висвітленню “СВО”, шляхом застосування методу семіотичного аналізу

дослідимо варіанти переконання цільових аудиторій. Цей метод дозволить: оцінити ключові фрагменти тексту; здійснити аналіз супроводжуючого тексту; класифікувати маніпулятивні складові; визначити емоційну складову.

Метод семіотичного аналізу графічного матеріалу № 1 (рис. 1):

- аналіз символічної складової: прапори росії є центральним елементом обох зображень. Вони символізують контроль і суверенітет, підкреслюючи меседж про «відновлення історичної справедливості»;
- аналіз супроводжуючого тексту: гасла на плакатах і банерах формують ілюзію легітимності анексії через підтримку з боку населення. Використання висловів «разом назавжди» та «вибір людей» підсилює ідею добровільності, хоча реальні обставини організації таких «референдумів» залишаються поза увагою;
- аналіз маніпулятивної складової: фраза «Які причини змусили росію...» встановлює меседж примусу, який виправдовує загарбницькі дії росії, знімаючи з неї відповідальність. Це формує чітку установку на виправдання збройної агресії;
- аналіз емоційної складової: зображення великих груп людей із прапорами створює враження масової підтримки дій росії, що має посилити довіру до цих рішень серед цільової аудиторії підручника.

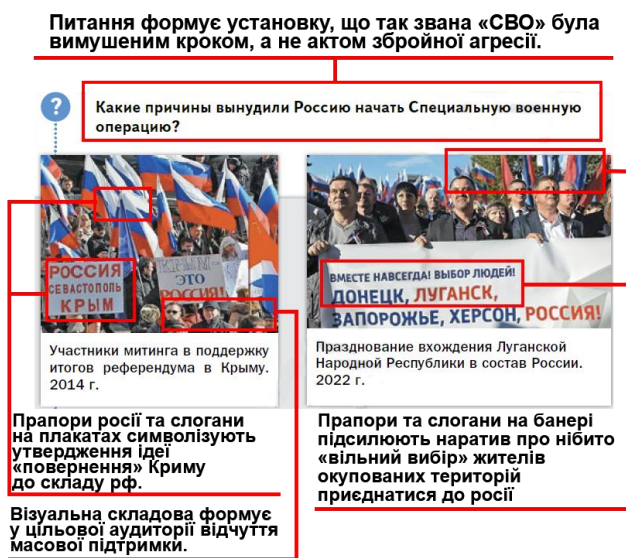


Рис. 1. Семіотичний аналіз матеріалу, присвяченого причинам війни

Отже, цей графічний матеріал з підручника є типовим прикладом пропагандистської маніпуляції через візуально-текстові елементи. Використання символів, таких як прапори, масові зібрання та патріотичні гасла, спрямоване на легітимізацію російської агресії. Питання сформульоване так, щоб однозначно вказати на виправдання дій росії, а зображення підсилюють ідею масової підтримки цих дій. В комплексі це має підірвати критичне мислення у цільовій аудиторії, формуючи в неї викривлене сприйняття історичних подій.

Семіотичний аналіз графічного матеріалу № 2 (рис. 2):

- аналіз символічної складової: чорний мармур із викарбуваними іменами загиблих дітей символізує трагічність і незворотність втрат, створюючи емоційний ефект жалю та скорботи. Дитячі іграшки та квіти підсилюють цей вплив, акцентуючи на невинності загиблих. Вони виступають метафорою обірваного дитинства і є універсально зрозумілими символами втрати, що викликають співчуття;

- аналіз супроводжуючого тексту: використання емоційно забарвлених висловів, таких як “янголи Донбасу”, “дитячою кров’ю омила земля”, має на меті викликати сильний емоційний відгук у школярів. Вираз “вбивчим феєрверком” викликає додаткову асоціацію із жорстокістю бойових дій, але не уточнює, хто є відповідальним за ці трагедії, що створює простір для маніпуляцій;

- аналіз маніпулятивної складової: меморіал використовується як символічний інструмент для закріплення меседжу про виняткову відповідальність української сторони за бойові дії та жертви серед цивільного населення. У тексті немає жодної згадки про дії росії, яка розпочала збройну агресію у 2014 році і продовжує її, що підкреслює односторонність викладу матеріалу. Акцент на “цивільних жителях днр и лнр” створює враження, що конфлікт виник через односторонню агресію України, без контексту участі російських військових і підтримки окупаційних адміністрацій росії;

- аналіз емоційної складової: поєднання трагічного візуального ряду (імена загиблих дітей, іграшки, квіти) та емоційно насиченого тексту створює потужний емоційний вплив, спрямований на формування ненависті до української сторони. Емоційна складова затьмарює раціональне осмислення подій і позбавляє цільову аудиторію можливості поставити питання щодо справжніх причин і винуватців війни.

Отже, меморіал “Алея янголів” і супровідний текст використовуються як потужний інструмент пропаганди для маніпуляції емоціями цільової аудиторії підручника. Символіка скорботи і втрат викликає співчуття та обурення, проте текст подає викривлену картину подій, уникаючи згадки про роль росії у розв’язанні війни. Це закріплює меседж про “захист” росії та “жорстокість” України, створюючи однобічну інтерпретацію трагічних подій.

Проведений семіотичний аналіз виявив систематичне використання візуально-текстових елементів для просування пропагандистських меседжів у російському підручнику з історії. Основна мета цих матеріалів – формування у школярів викривленого сприйняття війни, що веде російська федерація, її причин, перебігу та наслідків. Аналіз символів, знаків і текстів показує, що всі елементи гармонійно працюють на ідеалізацію війни та героїзацію учасників бойових дій, виправдовуючи загарбницьку політику росії.

Семіотичний аналіз надав змогу виділити основні маніпулятивні ознаки графічно-текстових матеріалів, а саме:

1. Персональні історії загиблих військовослужбовців представлені як зразки для наслідування. Їхній героїзм підкреслюється через військову форму, нагороди, меморіальні дошки, емоційно забарвлені описи досягнень і жертвовності. Це створює у школярів емоційний зв’язок із героями, формує уявлення про війну як про священний обов’язок.

2. Використання символів, таких як прапори, меморіальні дошки тощо, працює на підсилення патріотичних почуттів. Імена загиблих сакралізують їхні дії, закріплюючи ідею, що війна є виправданою і обов'язково героїчною.

3. Опис “подвигів” російських військових супроводжується непрямими звинуваченнями України та Заходу в агресії. Через контраст між “героїчними” діями російських солдатів і викривленим образом ворога створюється чіткий поділ на “своїх” і “чужих”, де росія позиціонується як сторона, що захищає.

**Текст супроводжує зображення, пояснюючи ЦА, що меморіал присвячений дітям, які загинули внаслідок обстрілів, мін та інших наслідків бойових дій з 2014 року.**

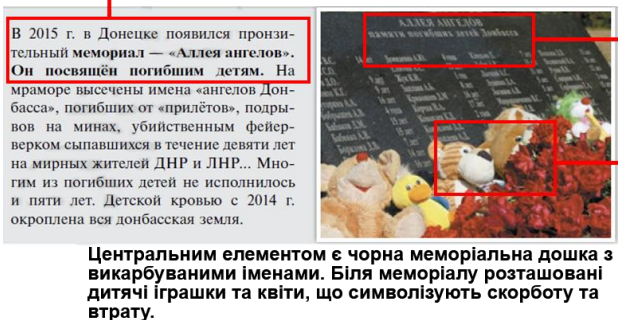


Рис. 2. Семіотичний аналіз матеріалу, присвячений меморіалу “Алея янголів”

У наведеному матеріалі використовуються графічні зображення для створення системи символів, що посилює вплив від основної текстової частини. Вона формує у читача викривлене розуміння війни і знижує здатність до критичного мислення. Такий підхід має довготривалі наслідки, оскільки сприяє вихованню покоління, що підтримуватиме ідеологічну політику держави без розуміння реальних причин і наслідків збройної агресії. “Ба більше, аналіз схожих ситуацій у минулому дозволяє припустити, що так окупанти планують “виховати” військову силу для подальшої війни з Україною. Саме цей сценарій росія реалізувала, мобілізувавши до своїх збройних сил українців із раніше окупованих Донецької та Луганської областей, а також із Криму” [10].

Після проведеного семіотичного аналізу, який виявив використання візуально-текстових елементів для маніпуляції емоціями та створення героїзованого образу російських військових, наступним кроком є дослідження того, як ця інформація організована і представлена в підручнику. Синтез фреймового аналізу та аналізу наративу дозволив дослідити, як російський підручник з історії сприяє підтримці офіційної версії початку “СВО” і формує сприйняття війни серед молоді через маніпуляцію подіями, персонажами та їхніми діями.

Тому для удосконалення семіотичного аналізу в загальному інформаційному процесі необхідно визначити перелік типових (окремих) інформаційних процесів (дій, фактів), що можуть спричинити деструктивні наслідки по відношенню до цільової аудиторії.

При цьому, слід зауважити, що коли за певний період часу з'являється прояв нової деструктивної інформації, якої візуально немає, то вона вноситься до переліку як нова, та визначається її вплив на поточні події і, за необхідністю, коригуються критерії, а також уточнюється реальний стан загального процесу.

З урахуванням цієї особливості, структурна блок-схема удосконаленого методу семіотичного аналізу для виявлення інформаційно-психологічного впливу на цільові аудиторії має вигляд, який наведений на рис. 3.

Наведений підхід має ряд переваг, пов'язаних із тим, що цільові аудиторії вірять в дезінформацію і самі можуть її поширювати, не здогадуючись про це. В такому випадку цільова аудиторія буде одночасно знаходитись під деструктивним інформаційним впливом та транслувати цей вплив на інші соціальні групи.



Рис. 3. Блок-схема удосконаленого методу семіотичного аналізу для виявлення інформаційно-психологічного впливу

У такому випадку зміст блок-схеми удосконаленого методу семіотичного аналізу для виявлення інформаційно-психологічного впливу необхідно деталізувати.

**Блок 1.**

1. Запитання повинно бути достатньо вузьким, щоб на нього можна було відповісти.

Занадто широке запитання. Що українські ЗМІ пишуть про США та НАТО?



Достатньо вузьке запитання. Чи є негативна інформація про США або НАТО у висвітленні українських ЗМІ про президентські вибори з початку року?

2. Запитання повинно бути про те, що можна вимірювати.

Не можна виміряти. Чи надасть НАТО Україні ПДЧ?

Можна вимірювати. Чи позитивно відреагували службовці НАТО та країн-членів Альянсу на зміну в Конституції України про рух у НАТО?

### **Блок 2.**

Минулі події повинні бути обмежені часом.

Не обмежене часом. Що угорські службовці кажуть про Україну?

Обмежене часом. Що угорські службовці сказали про Україну 60 днів до і 60 днів після парламентських виборів в Україні?

### **Блок 3.**

Гіпотеза – це припущення, здогад або запропоноване пояснення, яке зроблене на основі обмежених доказів і використовується для початку подальших досліджень. Іншими словами, гіпотеза – це первісна відповідь на ваше запитання для дослідження. Мета подальших досліджень та експериментів – це підтвердити гіпотезу.

Приклад. Чи є негативне висвітлення інформації про США або НАТО в українських ЗМІ про президентські вибори з початку року?

Гіпотеза. В українських ЗМІ пишуть про членство у НАТО в контексті президентських виборів.

### **Блок 4.**

В порівняльному апроксимаційному експерименті використовуються 10 якостей суспільних та публічно доступних даних М. Сальганік (Університет Принстон), а саме: “Великі”; завжди включені; не реагують на спостереження; неповні; іноді недоступні; не репрезентативні; дрейфуючі; алгоритмічно сплутані; “Брудні”; конфіденційні/делікатні.

### **Блок 5.**

Для аналізу результатів, які можуть повністю підтвердити гіпотезу рівня інформаційного впливу, необхідно мати певну сукупність показників, а для визначення його значимості, аж до критичного (допустимого) значення, – відповідні критерії.

### **Блок 6, 7.**

Перевіряється відповідність формалізації інформаційно-психологічного впливу шляхом врахування таких чинників:

- різномірність, розподіленість, багатозв'язність і динамічність джерел і об'єктів інформаційних загроз, що його породжують;
- надто велика кількість параметрів, що відображають суспільні інформаційні відносини і характеризують відповідні інформаційні загрози;
- відсутність необхідних статистичних даних внаслідок неповноти, неоперативності і недостовірності практично доступної інформації.

Врахування зазначеного дозволяє стверджувати, що саме ця аргументація є вірним припущенням.

Замість звичайного порівняння деструктивного інформаційно-психологічного впливу на цільові аудиторії можливо провести апроксимаційний експеримент. Прикладом апроксимаційного експерименту є порівняння двох схожих подій. Таке порівняння з'ясовує, які саме фактори впливають на поведінку цільових аудиторій (рис. 4).

**Блоки 1-3. Визначення переліку інформації, яка буде віднесена до інформації деструктивного характеру**

1. **Присутність службовців США.** Незважаючи на присутність Посла США Курта Волкера в Одесі, службовці США не отримали значну частку голосів від свого уряду під час розгортання в Україні порівняно з Грузією.
2. **Різні країни.** Російські ЗМІ висвітлили візит Дональда Кука в Україну більше ніж на п'ять разів, чим його візит до Грузії.
3. **Нещодавня агресія.** Російські ЗМІ зосередилися на Україні навіть під час візиту Дональда Кука до Грузії.



**Блоки 4; 5. Визначення  $N$  – категорій управляючих впливів (побудова гіпотези)**

1. **Присутність службовців США.** Це вказує на те, що присутність службовців США не вплинула на реакцію російських ЗМІ.
2. **Різні країни.** Це вказує на те, що Російська Федерація зараз більш чутлива до ознак підтримки США України, ніж Грузії.
3. **Нещодавня агресія.** Це вказує на те, що агресивний стан в Російській Федерації після нещодавньої анексії АР Крим краще пояснює відмінності в реакціях російських ЗМІ до ведення збройного конфлікту в Україні.



**Блоки 6; 7. Результати, які підтверджують гіпотезу.**

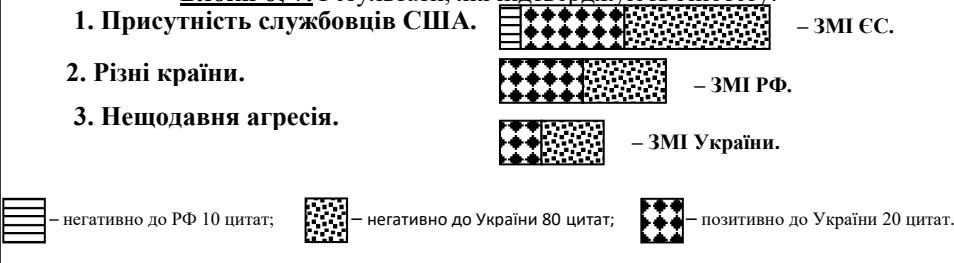


Рис. 4. Приклад порівняння як апроксимаційного експерименту

Таким чином, наведений приклад порівняння як апроксимаційного експерименту дозволяє оцінити та провести ефективний аналіз інформаційно-психологічного впливу, зокрема встановити прогнозовані зміни в поведінці кожної людини, громадянина та суспільства в цілому.

**Висновки та перспективи подальших досліджень**

Стаття присвячена удосконаленню методу семіотичного аналізу шляхом врахування гіпотези на управління інформацією для виявлення інформаційно-психологічного впливу, що дозволить підвищити спроможності сил оборони України у протидії інформаційним загрозам на деокупованих територіях. Дослідження ґрунтується на комплексному аналізі навчальної літератури російської федерації, яка виконує роль потужного інструменту державної пропаганди, орієнтованого на формування ідеологічно лояльної молоді. Вся структура підручників з історії росії, від текстового контенту до візуальних матеріалів, спрямована на підтримку кремлівської версії подій, пов'язаних із “спеціальною військовою операцією” (СВО). Пропагандистський меседж-бокс, який пронизує текст, зображення та

символи створюють цілісний наратив, що виправдовує агресивну зовнішню політику росії, формує образ “ворога” та підкреслює героїчність російської сторони у війні.

Такий підхід до освіти має негативні наслідки як для молоді, так і для суспільства в цілому. Він сприяє формуванню покоління, яке некритично сприймає інформацію, виправдовує збройну агресію та ігнорує міжнародні правові норми. Викривлене уявлення про історію закріплює упередженість і стереотипи, які можуть сприяти подальшій милітаризації свідомості населення. Для тимчасово окупованих територій України це також означає нав’язування чужої ідентичності та поступове знищення культурної самобутності.

В матеріалах активно використовується персоналізована історія загиблих військовослужбовців росії, що зображуються як герої. Їхній героїзм підкреслюється через опис досягнень, військову форму, нагороди та меморіальні дошки. Ці історії працюють на емоційному рівні, викликаючи гордість і формуючи у школярів уявлення, що служба в армії та участь у війні є найвищою формою патріотизму.

Емоційно забарвлена мова, використання трагічних символів, таких як меморіали загиблих дітей, та наголошення на загрозі ядерної війни створюють сильний емоційний ефект. Це приглушує раціональне мислення учнів і змушує їх приймати офіційні меседжі як єдину істину.

Отже, дослідження щодо інформаційно-психологічного впливу на цільову аудиторію ставлять нас перед фактом інформаційної загрози соціуму.

Тому наведене удосконалення методу семіотичного аналізу для виявлення інформаційно-психологічного впливу в умовах сучасного протистояння фейкам і дезінформації є необхідним інструментом оцінювання інформаційного простору.

Впровадження удосконаленого методу семіотичного аналізу для виявлення інформаційно-психологічного впливу доцільно почати з окремих функціональних областей. Це пояснюється цілим рядом причин.

По-перше, при виявленні інформаційно-психологічного впливу необхідно якнайшвидше довести відповідну інформацію до експертів, у той час як для виконання інших функцій робота в реальному масштабі часу, як правило, не обов’язкова.

По-друге, при різких змінах інформації зазначене дозволяє здійснювати аварійний нагляд за різноманітними системами, які збирають та обробляють інформацію від конкретних суб’єктів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мединский В.Р., Торкунов А.В. История. История России. 1945 год – начало XXI века: 11-й клас. Москва. Просвещение, 2023. 447 с.
2. Зеленін В.В. "Основи міфодизайну: Психотехнології керування медіареальністю. Навчально-методичний посібник", Київ, «Гнозис», 2017.
3. Почепцов Г.Г. Пропаганда как управление знанием и незнанием. 2023. URL: <https://detector.media/infospace/article/221158/2023-12-29-propaganda-kak-upravlenye-znanyem-y-neznanyem/>
4. Север. Реалии. Абсолютная поддержка "СВО" и война "до последнего украинца". Мединский показал новый учебник истории. 2023. URL: <https://www.severreal.org/a/medinskiy-pokazal-novyy-uchebnik-istorii/32538897.html>

5. Igor Sevryugin. Настоящее время. "Накачка ненавистью". Учитель истории – о новых пропагандистских учебниках, предметах и фильмах для российских студентов и школьников. 2023. URL: <https://www.currenttime.tv/a/propagandistskih-uchebnikah-predmetah-filmah-rossiyskih-studentov-shkolnikov/32554443.html>
6. Euronews. Пропаганда в российских школах: старшеклассникам будут преподавать историю сквозь призму Кремля. 2023. URL: <https://ru.euronews.com/2023/09/01/enst-russia-and-education>
7. Радио Свобода. Ненаучность, идеологизированность. Новый учебник по истории. 2023. URL: <https://www.svoboda.org/a/nenauchnostj-ideologizirovannostj-novyyu-uchebnik-po-istorii/32540157.html>
8. Octagon. Новый учебник истории променял логику на пропаганду. 2023. URL: [https://octagon.media/politika/novuj\\_uchebnik\\_istorii\\_promenyal\\_logiku\\_na\\_propagandu.html](https://octagon.media/politika/novuj_uchebnik_istorii_promenyal_logiku_na_propagandu.html)
9. Frank, Robert H. The Frame of Reference as a Public Good // The Economic Journal. – 1997. – Vol. 107 (November). – P. 1832–1847.
10. Зеркало Недели. В России показали новые учебники истории с разделом о «спецоперации». 2023. URL: <https://zn.ua/war/v-rossii-predstavili-novye-uchebniki-s-razdelom-o-spetsoperatsii.html>
11. Easterlin, Richard A. Does Economic Growth Improve the Human Lot? // Nations and Households in Economic Growth : Essays in Honor of Moses Abramovitz : / Paul A. David and Melvin W. Reder, eds. – New York : Academic Press, Inc., 1974. – 411 p.
12. Черта. «История – последнее, за что хватается утопающая идеология»: учитель истории Владимир Максаков – о новом учебнике Мединского и попытках власти обелить прошлое. 2023. URL: <https://cherta.media/interview/istoriya-uchebniki-propaganda>.
13. BBC News. Новый учебник истории для старшеклассников. Что в нем переписали и как это повлияет на образование в России. 2023. URL: <https://www.bbc.com/russian/articles/cmlxgvm7rejo>.

*Стаття надійшла до редакції 01.11.2024 і прийнята до друку після рецензування 03.01.2025*

## REFERENCES

1. Medinsky, V.R., Torkunov, A.V. (2023). History. History of Russia. 1945 – early 21st century: 11th grade. Moscow: Education.
2. Zelenin, V.V. (2017). Fundamentals of Myth Design: Psychotechnologies of Media Reality Management. Educational and Methodological Manual. Kyiv: "Gnozis".
3. Pocheptsov, G.G. (2023). Propaganda as management of knowledge and ignorance. Retrieved from <https://detector.media/infospace/article/221158/2023-12-29-propaganda-kak-upravlenye-znanyem-y-neznanyem/>
4. Absolute support of “SVO” and war “to the last ukrainian”. Medinsky showed a new history textbook. North. Realities. (2023, August 8). Retrieved from <https://www.severreal.org/a/medinskiy-pokazal-novyyu-uchebnik-istorii/32538897.html>
5. Sevryugin, Igor. (2023, August 21). "Pumping with Hatred." History Teacher on New Propaganda Textbooks, Subjects, and Films for Russian Students and Schoolchildren. *Current Time*. <https://www.currenttime.tv/a/propagandistskih-uchebnikah-predmetah-filmah-rossiyskih-studentov-shkolnikov/32554443.html>
6. Propaganda in Russian schools: high school students will be taught history through the prism of the Kremlin. Euronews. (2023). Retrieved from <https://ru.euronews.com/2023/09/01/enst-russia-and-education>

7. Unscientific, ideological. New history textbook. Radio Liberty. (2023). Retrieved from <https://www.svoboda.org/a/nenauchnostj-ideologizirovannostj-novyuy-uchebnik-po-istorii/32540157.html>
8. New history textbook swaps logic for propaganda. Octagon. (2023). Retrieved from [https://octagon.media/politika/novyj\\_uchebnik\\_istorii\\_promenyal\\_logiku\\_na\\_propagandu.html](https://octagon.media/politika/novyj_uchebnik_istorii_promenyal_logiku_na_propagandu.html)
9. Frank, Robert H. (1997). The Frame of Reference as a Public Good. *The Economic Journal*, 107 (November), 1832–1847.
10. Russia showed new history textbooks with a section on "special operations". Mirror of the Week. (2023). Retrieved from <https://zn.ua/war/v-rossii-predstavili-novye-uchebniki-s-razdelom-o-spetsoperatsii.html>
11. Easterlin, R.A. (1974). Does Economic Growth Improve the Human Lot? Nations and Households in Economic Growth : Essays in Honor of Moses Abramovitz. (Paul A. David and Melvin W. Reder, Eds.). New York: Academic Press, Inc.
12. "History is the last thing a drowning ideology grabs onto": history teacher Vladimir Maksakov on Medinsky's new textbook and the authorities' attempts to whitewash the past. Line. (2023). Retrieved from <https://cherta.media/interview/istoriya-uchebniki-propaganda>
13. New history textbook for high school students. What was rewritten in it and how it will affect education in Russia. BBC News. (2023). Retrieved from <https://www.bbc.com/russian/articles/cmlxgvm7rejo>

*The article was received 01.11.2024 and was accepted after revision 03.01.2025*

**Трофимчук Олександр Миколайович**

доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** [trofymchuk@nas.gov.ua](mailto:trofymchuk@nas.gov.ua)

**Заболотний Сергій В'ячеславович**

здобувач, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-1381-0510> **e-mail:** [s.zabolotnyi@ed.nuou.org.ua](mailto:s.zabolotnyi@ed.nuou.org.ua)

**Кацалап Віталій Олександрович**

докторант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4804-8022> **e-mail:** [v.katsalap@ed.nuou.org.ua](mailto:v.katsalap@ed.nuou.org.ua)

УДК 004.94 (004.62)

**Oleksandr Terentiev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Principal researcher, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-1753> *e-mail*: o.terentiev@gmail.com

**Volodymyr Duda**, graduate student, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4278-4635> *e-mail*: dudavolodimir@gmail.com

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

## METHOD FOR RESTORING MISSING DATA BASED ON A COMBINED EXPONENTIAL SMOOTHING MODEL

***Abstract.** Data processing and analysis are often accompanied by the problem of missing values, which can significantly affect the accuracy of predictive models and decision-making. One of the main causes of missing data in energy consumption is the periodic shutdown of systems responsible for data collection and transmission. Such disruptions can lead to data loss, complicating further processing and analysis. Therefore, an approach has been developed for filling in missing values based on exponential smoothing with adaptive coefficients determined by Fibonacci numbers. This method effectively accounts for both short-term and long-term patterns in the data, contributing to a more accurate reconstruction of lost values. This article examines a method for recovering missing data based on a combined exponential smoothing model, applied to hourly energy consumption data for the period 2016–2018. The proposed approach utilizes a regression model in which the regressors are the values of the exponential moving average, determined using smoothing coefficients and window sizes based on Fibonacci numbers. This approach effectively accounts for both new and older information by adapting weight coefficients for more accurate recovery of missing values. It has been found that when small Fibonacci numbers are used to determine the size of the sliding window and weight coefficients, the formation of exponentially smoothed values is primarily influenced by the most "recent data" (the latest, most recently obtained values). The use of Fibonacci numbers to determine smoothing parameters in the exponential smoothing method allows for the adaptive consideration of both short-term and long-term trends in time series. The proposed data reconstruction model is based on combined forecasting using six exponential smoothing models, whose parameters correspond to specific Fibonacci numbers. The combined model is built through regression analysis, enabling the adaptive evaluation of weight coefficients at each forecasting step.*

***Keywords:** mathematical modeling, data processing, data recovery, exponential smoothing, Fibonacci numbers.*

О.М. Терентьев, В.О. Дуда

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

## МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ ПРОПУСКІВ У ДАНИХ НА ОСНОВІ КОМБІНОВАНОЇ МОДЕЛІ ЕКСПОНЕНЦІЙНОГО ЗГЛАДЖУВАННЯ

***Анотація.** Обробка та аналіз даних часто супроводжуються проблемою пропущених значень, що може значно впливати на точність моделей прогнозування та ухвалення рішень. Однією з основних причин виникнення пропусків у даних щодо енергоспоживання є періодичне відключення систем, що безпосередньо займаються збором та передачею інформації. Такі перебої можуть спричиняти втрату частини даних, що ускладнює їх подальшу обробку та аналіз. Тому розроблено підхід до заповнення пропущених значень, заснований на експоненційному згладжуванні з адаптивними коефіцієнтами, що визначаються за числами Фібоначчі. Такий метод дозволяє ефективно враховувати як короткострокові, так і довгострокові закономірності в даних, що сприяє більш точному відновленню втрачених значень. В даній статті розглядається метод відновлення пропущених даних на основі комбінованої моделі експоненційного згладжування, застосованої до погодинних даних енергоспоживання за період 2016–2018 років. Запропонований підхід використовує регресійну модель, у якій регресорами виступають значення експоненційного ковзного середнього, визначені за допомогою коефіцієнтів згладжування та розмірів ковзного вікна, що базуються на числах Фібоначчі. Такий підхід дозволяє ефективно враховувати як нову, так і старішу інформацію, адаптуючи вагові коефіцієнти для точнішого відновлення пропущених значень. Використання чисел Фібоначчі для визначення параметрів згладжування у методі експоненційного згладжування дозволяє адаптивно враховувати як короткострокові, так і довгострокові тенденції в часових рядах. Запропонована модель відновлення даних ґрунтується на комбінованому прогнозуванні з використанням шести моделей експоненційного згладжування, параметри яких відповідають певним числам Фібоначчі.*

***Ключові слова:** математичне моделювання, обробка даних, відновлення даних, експоненційне згладжування, числа Фібоначчі.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.125-131>

### Вступ

Обробка та аналіз даних часто супроводжуються проблемою пропущених значень, що може значно впливати на точність моделей прогнозування та ухвалення рішень. Однією з основних причин виникнення пропусків у даних щодо енергоспоживання є періодичне відключення систем, що безпосередньо займаються збором та передачею інформації. Такі перебої можуть спричиняти втрату частини даних, що ускладнює їх подальшу обробку та аналіз.

Тому розроблено підхід до заповнення пропущених значень, заснований на експоненційному згладжуванні [1] з адаптивними коефіцієнтами, що визначаються за числами Фібоначчі [2]. Такий метод дозволяє ефективно враховувати як короткострокові, так і довгострокові закономірності в даних, що сприяє більш точному відновленню втрачених значень.

Запропонований метод може знайти застосування у широкому спектрі завдань, пов'язаних із аналізом часових рядів, зокрема в енергетичній галузі [3], де точність прогнозування та відновлення даних має вирішальне значення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Схоже дослідження було проведено в роботі "Прогнозування короткочасних даних для крипторинку" [4], де розглядалося застосування методів експоненційного згладжування для прогнозування ціни криптовалют. У цій роботі оцінювалася точність прогнозування за допомогою показників RMSE, MAPE та аналізу тренду. Дослідження базувалося на даних криптобіржі Binance для тікеру BTC-USDT і передбачало тестування різних параметрів розміру вікна та коефіцієнта згладжування. Результати показали, що метод простого експоненційного згладжування дає найкращі результати у вибраному проміжку часу. Це підтверджує ефективність експоненційного згладжування для роботи з часовими рядами, що і стало основою для застосування аналогічного підходу у даній роботі для відновлення пропущених значень у даних енергоспоживання.

**Коефіцієнти згладжування на основі чисел Фібоначчі.** Використання чисел Фібоначчі [5] для визначення параметрів згладжування забезпечує адаптивність моделі, дозволяючи враховувати як короткострокові, так і довгострокові тенденції у даних. Такий підхід сприяє точнішому відновленню пропущених значень, оскільки він поєднує гнучкість експоненційного згладжування з математично обґрунтованим вибором коефіцієнтів.

На основі чисел Фібоначчі обчислюються коефіцієнти згладжування для методу експоненційного згладжування.

Загальна формула для обчислення згладженого значення  $EWM_t$  (Exponential Weighted Moving Average) має вигляд [1]:

$$EWM_t = (1 - \alpha) \cdot EWM_{t-1} + \alpha \cdot X_t,$$

де  $EWM_t$  – середнє значення за методом експоненційного згладжування у момент часу  $t$ ,

$X_t$  – значення вхідного ряду даних у момент часу  $t$ ,

$EWM_{t-1}$  – середнє значення у момент часу  $t - 1$ ,

$\alpha$  – це коефіцієнт згладжування,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , значення якого обчислюються за формулою [1]:

$$\alpha = \frac{2}{SPAN + 1},$$

де SPAN – це показник, який прирівнюється відповідному значенню числа Фібоначчі. SPAN в перекладі з англійської означає "інтервал", "ширина" або "діапазон".

За своїм сенсом коефіцієнт згладжування (рис. 1) вказує на те, який вклад робить попереднє значення у обчислення загального значення ковзного середнього.



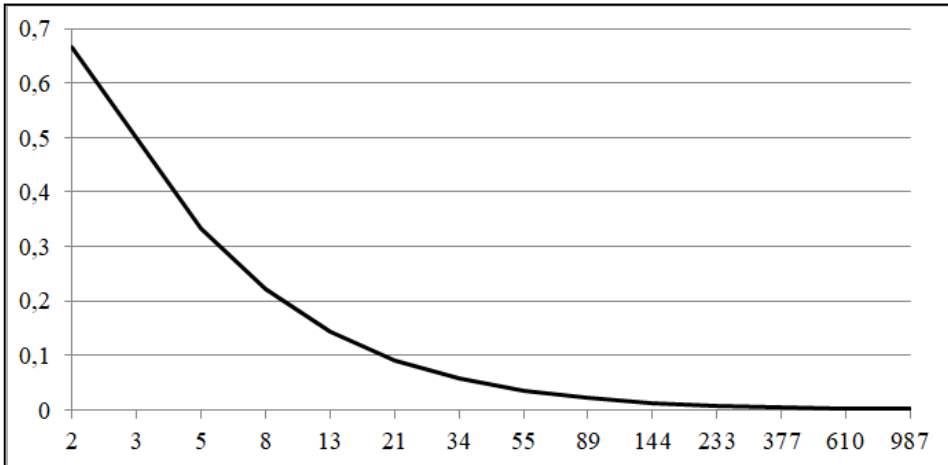


Рис. 1. Вісь OX – значення числа Фібоначчі (параметр SPAN), вісь OY – значення коефіцієнта згладжування  $\alpha$

За результатами вагових коефіцієнтів, варіювання значення SPAN впливає на обчислення значення коефіцієнта згладжування  $\alpha$ , яке показує який внесок у формування EWM робить нове значення. Відповідні вагові коефіцієнти наступних лагових значень спадають експоненційно [1] за формулою  $\alpha \cdot (1 - \alpha)^n$  і послідовно наближаються до нуля (табл. 1).

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів значень лагу

n	Лаг	Коефіцієнт згладжування
0	t	$\alpha = 0,222(2)$
1	t-1	$\alpha \cdot (1 - \alpha) = 0,17284$
2	t-2	$\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - \alpha) = 0,134431$
3	t-3	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^3 = 0,104557$
4	t-4	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^4 = 0,081322$
5	t-5	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^5 = 0,063251$
6	t-6	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^6 = 0,049195$
7	t-7	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^7 = 0,038263$
8	t-8	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^8 = 0,02976$
9	t-9	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^9 = 0,023147$
...	...	...
66	t-66	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^{66} = 0,000000014$
67	t-67	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^{67} = 0,000000011$
68	t-68	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^{68} = 0,000000008$
69	t-69	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^{69} = 0,000000007$
70	t-70	$\alpha \cdot (1 - \alpha)^{70} = 0,0000000050$

**Метод відновлення даних на основі комбінованого прогнозу на основі результатів моделювання методом експоненційного згладжування.** Для відновлення відсутніх даних використовується метод, що включає побудову шести моделей експоненційного згладжування [6] (M1–M6) з параметром SPAN, що відповідає числам Фібоначчі: 13, 144, 233, 377, 610 і 987.

Після чого будується модель комбінованого прогнозу, на основі прогнозних значень, отриманих на математичних моделях М1–М6, із використанням моделі регресії наступного вигляду

$$M_{COMBINE} = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i \cdot M_i .$$

Значення коефіцієнтів моделі,  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ , оцінюються адаптивно динамічно на кожному кроці, що вказано в таблиці 2.

Таблиця 2. Приклад побудови таблиці оцінок параметрів моделі, на 1485-й ітерації алгоритму

Змінні	Оцінка параметра моделі	Стандартна похибка	t-значення Стьюдента	p-значення Стьюдента
$a_0$	0,0109	0,00549	1,98	0,0472
$a_1$	0,19712	0,00526	37,44	< 0,0001
$a_2$	0,12885	0,00642	20,08	< 0,0001
$a_3$	0,06492	0,0076	8,54	< 0,0001
$a_4$	0,07883	0,01309	6,02	< 0,0001
$a_5$	-0,02211	0,02373	-0,93	0,3516
$a_6$	0,34387	0,02814	12,22	< 0,0001

В таблиці 3 наведено результати моделювання, щодо відновлення пропусків в даних, на основі даних погодинного енергоспоживання від компанії ДТЕК за період 2016-2018 років. В якості критерію оцінювання якості роботи методу використовувалася статистика MAPE (mean absolute percent error) – середня абсолютна похибка в процентах.

Таблиця 3. Значення похибки MAPE при заповненні пропусків в даних із використанням запропонованої моделі

Погодинний часовий ряд	Процент пропусків в даних, %			
	5	10	15	20
Дані ДТЕК за 2016 рік	5,03	6,53	7,57	8,92
Дані ДТЕК за 2017 рік	5,08	5,97	7,58	9,87
Дані ДТЕК за 2018 рік	5,32	7,28	9,54	11,61

Як можна побачити з отриманих результатів, наведених в таблиці вище, чим більше відсоток пропусків даних, тим гірша статистика MAPE, тобто збільшується розходження між реальним та відновленим значенням пропуску. Для випадків наявності 5% пропусків середнє значення похибки MAPE варіюється від 5,03 до 5,32% та поступово збільшується при зростанні кількості пропусків, та у випадку наявності 20% відсутніх даних сягає значення MAPE від 8,87 до 11,61%.

На рисунку 2 наведений частковий приклад реальних та змодельованих значень пропусків даних щодо задачі енергоспоживання.

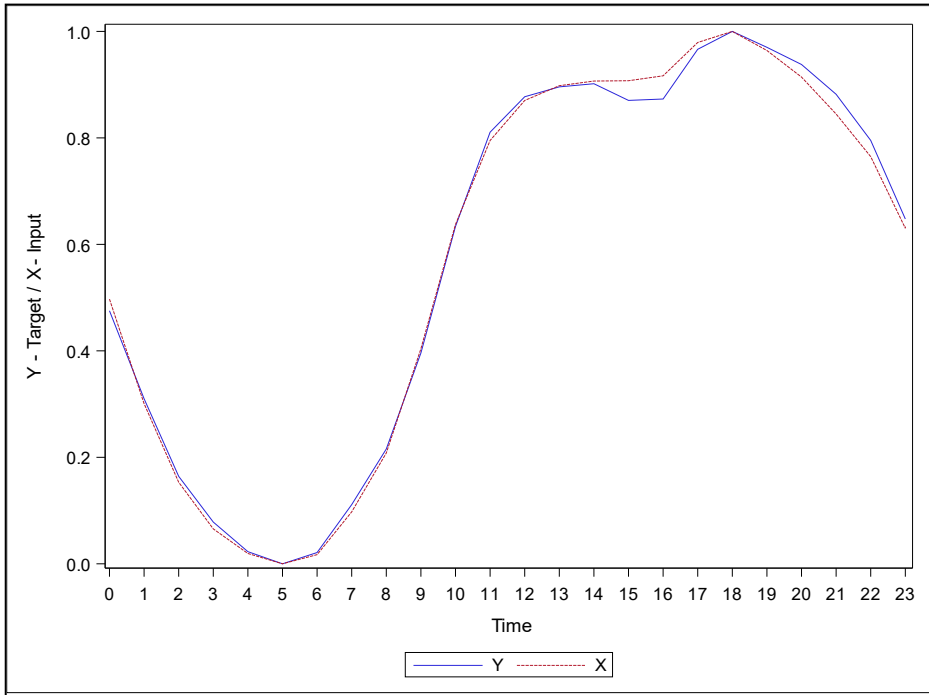


Рис. 2. Приклад відновлення пропусків даних у період з 14 до 18 години. Вісь OX – години, вісь OY – реальне та прогнозне значення погодинного енергоспоживання. Суцільна лінія – реальні дані, штрихова лінія – дані з відновленими пропусками

## Висновки

З’ясовано, що у випадках, коли використовуються малі значення чисел Фібоначчі для формування розміру ковзного вікна та вагових коефіцієнтів, на формування експоненційно згладжених значень в першу чергу впливають найбільш “свіжі дані” (останні, нещодавно отримані).

В той час, як по мірі збільшення значень чисел Фібоначчі, що використовуються для формування розміру ковзного вікна та вагових коефіцієнтів, відбувається перетікання ступеня важливості та загального впливу від нещодавно отриманих даних до більш “застарілих”, але це дозволяє в свою чергу враховувати при обчисленнях більш довгу історію, щодо накопичених даних про процес, що досліджується.

Використання чисел Фібоначчі для визначення параметрів згладжування у методі експоненційного згладжування дозволяє адаптивно враховувати як короткострокові, так і довгострокові тенденції в часових рядах.

Запропонована модель відновлення даних ґрунтується на комбінованому прогнозуванні з використанням шести моделей експоненційного згладжування, параметри яких відповідають певним числам Фібоначчі. Комбінована модель будується шляхом регресійного аналізу, що дозволяє адаптивно оцінювати вагові коефіцієнти на кожному кроці прогнозування.

Експериментальні результати, отримані на даних погодинного енергоспоживання компанії ДТЕК за 2016–2018 роки, показують, що якість заповнення пропущених значень залежить від відсотка відсутніх даних. При

5% пропусків середня абсолютна похибка MAPE варіюється в межах 5,03–5,32%, тоді як при 20% відсутніх даних вона зростає до 8,87–11,61%. Це підтверджує, що метод ефективно працює для заповнення незначної кількості пропущених значень, але втрачає точність при великій кількості відсутніх даних.

## REFERENCES

1. Brown, R.G. (1956). Exponential Smoothing for Predicting Demand. Cambridge, Massachusetts.
2. Tiner, J.H. (2004). Exploring the World of Mathematics: From Ancient Record Keeping to the Latest Advances in Computers. New Leaf Publishing Group.
3. Cao, Y., Yu, J., Zhong, R. et al. (2025). Forecasting Renewable energy and electricity consumption using evolutionary hyperheuristic algorithm. *Sci Rep*, 15, 2565. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87013-8>
4. Duda, V., & Rolik, O. (2023). Forecasting short-term data for the crypto market. *Adaptive Automatic Control Systems*, 1(42), 141–152 (In Ukrainian). [Дуда, В., & Ролік, О. (2023). Прогнозування короточасних даних для крипторинку. *Адаптивні Системи Автоматичного Управління*, 1(42), 141–152]. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.42.2023.279107>
5. Grigas, A. (2013). The Fibonacci sequence. In Senior Thesis [Thesis]. Liberty University.
6. Risteski, D., Kulakov, A., & Davcev, D. (2005). Single exponential smoothing method and neural network in one method for time series prediction. *IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2, 741–745. <https://doi.org/10.1109/iccis.2004.1460680>

*Стаття надійшла до редакції 14.10.2024 і прийнята до друку після рецензування 23.01.2025*

*The article was received 14.10.2024 and was accepted after revision 23.01.2025*

### **Терентьєв Олександр Миколайович**

доктор технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

**Адреса робоча:** бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-1753> **e-mail:** o.terentiev@gmail.com

### **Дуда Володимир Олександрович**

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

**Адреса робоча:** бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4278-4635> **e-mail:** dudavolodimir@gmail.com

УДК 502.51:504.5

**Vasyl Trysnyuk**, Doctor of Technical Sciences, professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** [trysnyuk@ukr.net](mailto:trysnyuk@ukr.net)

**Volodymyr Ehorov**, postgraduate  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1738-1375> **e-mail:** [volodymyregorov@ukr.net](mailto:volodymyregorov@ukr.net)

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

## **MATHEMATICAL MODEL OF THE DISTRIBUTION OF RADIO MONITORING RESOURCES FOR OBSERVATION OF SATELLITE COMMUNICATION CHANNELS USING NEURAL NETWORKS**

**Abstract.** *The work is devoted to solving a scientific and practical problem, which consists in developing a mathematical model for distributing radio monitoring equipment for observing satellite communication channels using neural networks. To increase the efficiency of resource allocation, it is proposed to use advanced artificial intelligence algorithms, in particular deep neural networks (DNN), reinforcement learning (RL) and graph neural networks (GNN). The use of such methods allows to significantly increase the adaptability of the system, increase the accuracy of analysis and ensure optimization of resource allocation. Mathematical models and innovative methods for controlling radio monitoring equipment that take into account variable parameters of satellite channels have been improved, adaptive resource allocation algorithms are used. To determine the time characteristics, most of which are for processing by a convolutional neural network, not only static node parameters, such as signal power or frequency, but also dynamic indicators that change in time are taken into account. To analyze and optimize resource allocation in satellite communication channels and radio monitoring facilities, we use a convolutional neural network (CNN) in combination with graph neural networks (GNN), the following structure of which can be effectively represented in the form of a graph. This allows obtaining spatial-temporal dependencies and increasing the accuracy of modeling. It has been proven that to determine the time characteristics processed by a convolutional neural network (CNN), not only static node parameters, such as signal power or frequency, but also dynamic changes in these parameters over time are taken into account. This allows for adaptive analysis of changing operating conditions of satellite communication channels and radio monitoring facilities, which ensures the accuracy of modeling and forecasting of signals. The use of neural networks improves the analysis of satellite communication channels, increasing the level of informativeness and speed of data processing during radio monitoring.*

**Keywords:** *information technology, mathematical model, time characteristics, neural networks, modeling accuracy, control system, control algorithms, satellite communication channels.*

**В.М. Триснюк, В.О. Єгоров**

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

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ЗАСОБІВ РАДІОМОНІТОРИНГУ НА СПОСТЕРЕЖЕННЯ СУПУТНИКОВИХ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

***Анотація.** Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання, що полягає в розробці математичної моделі розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження супутникових каналів зв'язку із використанням нейронних мереж. Для підвищення ефективності розподілу ресурсів пропонується застосування передових алгоритмів штучного інтелекту, зокрема глибоких нейронних мереж (Deep Neural Networks, DNN), навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) та графічних нейронних мереж (Graph Neural Networks, GNN). Використання таких методів дозволяє суттєво підвищити адаптивність системи, точність аналізу та забезпечити оптимізацію розподілу ресурсів.*

*Вдосконалено математичні моделі та інноваційні методи управління засобами радіомоніторингу, що враховують змінні параметри супутникових каналів, застосовують адаптивні алгоритми розподілу ресурсів. Для визначення часових характеристик, більшість для обробки згортковою нейромережею, враховуються не лише статичні параметри вузлів, такі як потужність сигналу чи частоти, але й динамічні показники, що змінюються у часі. Для аналізу та оптимізації розподілу ресурсів у супутникових каналах зв'язку та засобів радіомоніторингу використовуємо згорткову нейронну мережу (CNN) у поєднанні з графовими нейронними мережами (GNN), наступна їх структура може бути ефективно представлена у вигляді графа. Це дозволяє отримати просторово-часові залежності та підвищити точність моделювання, а також адаптивно аналізувати змінні умови роботи супутникових каналів зв'язку та засобів радіомоніторингу, що забезпечує точність моделювання та прогнозування сигналів. Застосування нейронних мереж покращує аналіз супутникових каналів зв'язку, підвищуючи рівень інформативності та швидкість обробки даних під час радіомоніторингу.*

***Ключові слова:** інформаційні технології, математична модель, часові характеристики, нейронні мережі, точність моделювання, система керування, алгоритми керування, супутникові канали зв'язку.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.132-138>

### **Вступ**

Удосконалення процесу розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження супутникових каналів є актуальним завданням, яке потребує врахування невизначеності та динамічних змін у середовищі. Традиційні методи, такі як динамічне програмування, методи евристичної оптимізації та нечітка логіка, мають обмеження, особливо у випадках, коли параметри каналів змінюються у реальному часі.

Для підвищення ефективності розподілу пропонується використання методів штучного інтелекту, зокрема глибоких нейронних мереж (Deep Neural Networks, DNN), навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) та графових нейронних мереж (Graph Neural Networks, GNN). Такі методи

дозволяють значно покращити адаптивність системи, підвищити точність аналізу та забезпечити ефективний розподіл ресурсів в умовах змінної радіоелектронної обстановки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні методи розподілу засобів радіомоніторингу для перехоплення та аналізу супутникових каналів зв'язку мають низку суттєвих недоліків, що знижують ефективність збору та аналізу інформації. З огляду на зростаюче використання адаптивних технологій у супутникових системах зв'язку, а також ускладнення методів маскування та шифрування сигналів, традиційні підходи до радіомоніторингу не забезпечують достатньої оперативності, гнучкості та точності. Тому існує необхідність розробки нових підходів до розподілу засобів радіомоніторингу, які враховуватимуть динамічні характеристики супутникових каналів, використовуватимуть адаптивні алгоритми розподілу ресурсів та інтегруватимуть методи машинного навчання для підвищення ефективності аналізу та розпізнавання сигналів.

В Україні основними науковцями в області космічних досліджень ґрунтів являються: В.І. Лялько – спектральні характеристики рослинного покриву [1, 2]; М.О. Попов – прогнозування врожайності зернових культур за багатоспектральними даними ДЗЗ [3], О.М. Трофимчук, Г.Я. Красовський, Л.Д. Греков – космічний моніторинг забруднення земель [4, 5]; Р.М. Панас – космічний моніторинг деградації ґрунтів [6].

У сфері розробки математичних моделей для розповсюдження засобів радіомоніторингу супутникових каналів зв'язку із застосуванням нейронних мереж в Україні працюють такі науковці: О.В. Мартиненко, В.Г. Бондаренко, С.А. Ігнатенко, Ю.В. Пастернак. Міжнародні науковці: Zoltán Paláncz – угорський вчений, Nicolas Vernier – французький дослідник, Wolfgang Gerhardt – дослідник з Німеччини, Zhang Weilong – китайський експерт у сфері штучного інтелекту та оптимізації розподілу ресурсів, Nicolas Vernier – французький дослідник. У своїх роботах вони досліджували методи керування антенними системами, які можуть бути застосовані в радіомоніторингу супутникових каналів зв'язку.

**Метою цієї роботи** є вдосконалення математичної моделі розподілу засобів радіомоніторингу на спостереження супутникових каналів зв'язку із використанням нейронних мереж.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати таке завдання:

- проаналізувати сучасні канали радіомоніторингу на спостереження супутникового зв'язку із використанням нейронних мереж;
- дослідити математичні моделі для оцінювання показників важливості каналів передачі даних систем супутникового зв'язку.

**Об'єктом дослідження** є процес інформаційних технологій для оцінювання супутникового зв'язку із використанням нейронних мереж.

## **Виклад основного матеріалу дослідження**

Розглянемо задачу розподілу засобів радіомоніторингу як багатокроковий процес прийняття рішень. Нехай стан системи на кроці  $t$  визначається як  $S_t$ , а дія, що виконується, – як  $A_t$ . Нехай функція важливості або винагороди  $R_t$  визначає ефективність вибору конкретного рішення. Тоді задача оптимізації формалізується рівнянням Беллмана:

$$V(S_t) = \max_{A_t} [R(S_t, A_t) + \gamma V(S_{t+1})],$$

де:

- $V(S_t)$  – оптимальна функція важливості;
- $\gamma$  – коефіцієнт дисконтування, що визначає вагу майбутніх винагород.

Для наближеного розв'язання цього рівняння використовується глибоке навчання з підкріпленням (Deep Q-Learning), що оновлює значення функції  $Q$ -цінностей за правилом:

$$Q(S_t, A_t) = R_t + \gamma \max_A Q(S_{t+1}, A).$$

Це дозволяє ефективно адаптувати розподіл засобів до динамічних умов обстановки.

Далі застосуємо згорткову нейронну мережу (CNN) в поєднанні з графовими нейронними мережами (GNN), оскільки структура супутникових каналів і засобів радіомоніторингу може бути представлена у вигляді графа.

Система радіомоніторингу та супутникові канали формують граф  $G = (V, E)$ , де:

- $V = \{v_i\}$  – множина вузлів (засоби радіомоніторингу, супутникові канали);
- $E = \{e_{ij}\}$  – множина зв'язків між вузлами (можливість спостереження каналу засобом радіомоніторингу);
- $X = \{x_i\}$  – набір вхідних ознак кожного вузла (частота, пропускна здатність, рівень сигналу тощо).

Сформуємо вхідні тензори для нейромережі. У представленні даних для графової нейромережі використовується матриця суміжності  $A$ , яка має розмір  $|V| \times |V|$ , де кожен елемент  $A_{ij}$  вказує на зв'язок між вузлом  $i$  вузлом  $j$ :

- $A_{ij} = 1$ , якщо існує з'єднання між  $i$  та  $j$ .
- $A_{ij} = 0$ , якщо зв'язку немає.

Ця матриця допомагає мережі визначати взаємозв'язки між різними засобами радіомоніторингу та супутниковими каналами.

Для покращення аналізу графової структури застосовується спектральна декомпозиція:

$$A = U\Lambda U^T,$$

де:

- $U$  – матриця власних векторів;
- $\Lambda$  – діагональна матриця власних значень.

Що стосується сигнальних характеристик (вхідний тензор  $X$ ) кожен вузол у графі має набір характеристик, що описують його стан. Вхідний тензор  $X$  має розмірність:

$$X \in R^{|V|*F},$$

де:

- $|V|$  – кількість вузлів;
- $F$  – кількість характеристик кожного вузла (частота передачі даних, потужність сигналу, ширина каналу, співвідношення сигнал/шум, ідентифікатор каналу).



Для формування часових характеристик для обробки згортковою неймережею враховуються не тільки статичні характеристики вузлів (наприклад, потужність сигналу або частота), але й динамічні параметри, що змінюються у часі. Для цього вводиться часовий тензор  $X_t$ , що має розмір:

$$X_t \in R^{|V|*C*T},$$

де:

- $C$  – кількість каналів або сенсорних вимірювань (наприклад, рівень сигналу у різних частотних діапазонах);
- $T$  – кількість часових моментів (дані про стан каналу).

Наступним етапом отримані графові та часові характеристики проходять обробку двома незалежними неймережами: Graph Convolutional Network, яка обробляє графові структури та знаходить оптимальні взаємозв'язки між вузлами, та Convolutional Neural Network, що аналізує часові ряди для визначення закономірностей у зміні сигналу (рис. 1).

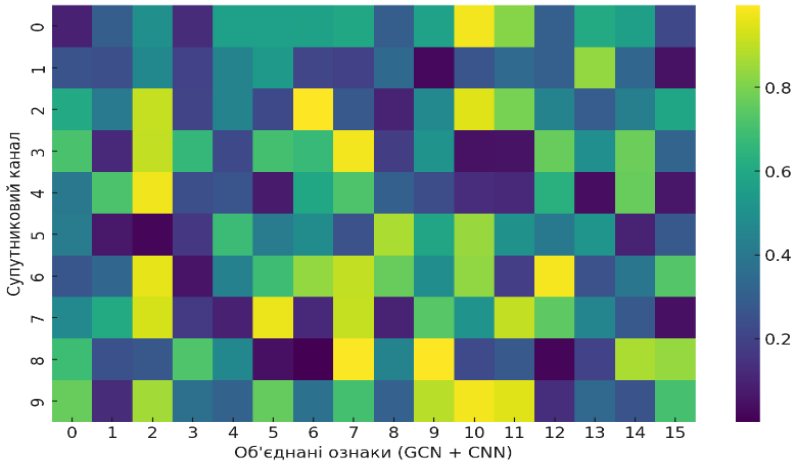


Рис. 1. Результат аналізу перехоплення супутникових каналів зв'язку після обробки неймережами Graph Convolutional Network та Convolutional Neural Network

На графіку вісь “супутниковий канал” відображає індекси супутникових каналів (від 0 до 9), для яких було виконано аналіз. Вісь “об'єднані ознаки” відображає об'єднані ознаки, отримані після обробки даних GCN та CNN (від 0 до 15). Ці ознаки є результатом інтеграції графових і часових характеристик сигналу, причому:

- жовтий колір: відображає високі значення ознак (близькі до 0.8–1.0), що можуть вказувати на сильні взаємозв'язки або важливість певного супутникового каналу для конкретної ознаки;
- фіолетовий колір: відображає низькі значення ознак (близькі до 0.0–0.2), які є менш важливі;
- зелений і синій – це середні значення ознак між максимальними та мінімальними границями.

Таким чином, результати показують, як супутникові канали співвідносяться з певними об'єднаними ознаками, де кольорові зміни дозволяють визначити, які канали мають найвищу активність або важливість у відповідності до конкретної ознаки.

## Висновки

Розроблено та обґрунтовано математичну модель розподілу засобів радіомоніторингу для спостереження супутникових каналів зв'язку із використанням сучасних методів штучного інтелекту, таких як Graph Convolutional Network та Convolutional Neural Network. Запропонований підхід передбачає інтеграцію графових та часових характеристик сигналів, що дозволяє ефективно аналізувати складні взаємозв'язки між елементами системи супутникового зв'язку, враховуючи як статичні, так і динамічні параметри сигналів. GCN забезпечує глибокий аналіз графових структур, виявляючи оптимальні зв'язки між вузлами мережі, тоді як CNN використовується для визначення закономірностей у часових рядах. Результати моделі підтверджують її ефективність у реальних умовах, демонструючи високу адаптивність до динамічних змін у характеристиках сигналів, здатність виявляти аномалії та підвищувати точність ідентифікації важливих ознак. Представлений підхід дозволяє автоматизувати процес розподілу ресурсів радіомоніторингу та оптимізувати їх використання, що особливо актуально в умовах змінної радіоелектронної обстановки. Використання нейронних мереж підвищує ефективність аналізу супутникових каналів зв'язку, забезпечуючи підвищення рівня інформативності та оперативності при веденні радіомоніторингу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kipf, T.N., & Welling, M. (2017). Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks. International Conference on Learning Representations (ICLR).
2. Wang, X., Yu, H., & Gu, X. (2020). Graph Convolutional Neural Network-Based Signal Classification for Satellite Communication Systems. IEEE Access, 8, 177477-177486.
3. Zhang, X., Li, Z., & Jin, L. (2019). Deep Learning for Satellite Communications: Benefits and Challenges. IEEE Communications Magazine, 57(9), 70-75.
4. Velickovic, P., Cucurull, G., Casanova, A., Romero, A., Lio, P., & Bengio, Y. (2018). Graph Attention Networks. International Conference on Learning Representations (ICLR).
5. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
6. Chen, Z., Zhang, Z., & Liu, J. (2022). Time-Series Analysis of Satellite Data Using Convolutional Neural Networks. Neural Computing and Applications, 34(7), 5907-5917.
7. Бойчук, О.Є., Сліпченко, В.О., Гнатенко, І.А. (2021). Використання методів штучного інтелекту для аналізу сигналів супутникових систем зв'язку. Науковий вісник НТУУ «КПІ», 3(15), 45–53.
8. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. (2021). Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 343 с. ISBN 978-617-7468-53-9.
9. Петренко, В.І., Тарасенко, Л.М., Руденко, А.О. (2019). Моделі аналізу та класифікації супутникових каналів зв'язку в умовах завад. Наукові записки НАН України, 5(27), 72–80.
10. Байрачний, О.В., Сидоренко, П.О. (2022). Застосування нейромереж для обробки часових рядів у системах радіомоніторингу. Системи управління, навігації та зв'язку, 3(67), 89–97.

*Стаття надійшла до редакції 23.12.2024 і прийнята до друку після рецензування 04.03.2025*

## REFERENCES

1. Kipf, T.N., & Welling, M. (2017). Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks. International Conference on Learning Representations (ICLR).
2. Wang, X., Yu, H., & Gu, X. (2020). Graph Convolutional Neural Network-Based Signal Classification for Satellite Communication Systems. *IEEE Access*, 8, 177477-177486.
3. Zhang, X., Li, Z., & Jin, L. (2019). Deep Learning for Satellite Communications: Benefits and Challenges. *IEEE Communications Magazine*, 57(9), 70-75.
4. Velickovic, P., Cucurull, G., Casanova, A., Romero, A., Lio, P., & Bengio, Y. (2018). Graph Attention Networks. International Conference on Learning Representations (ICLR).
5. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
6. Chen, Z., Zhang, Z., & Liu, J. (2022). Time-Series Analysis of Satellite Data Using Convolutional Neural Networks. *Neural Computing and Applications*, 34(7), 5907-5917.
7. Boychuk, O.Ye., Slipchenko, V., & Hnatenko, I.A. (2021). Using artificial intelligence methods to analyze signals of satellite communication systems. *Scientific Bulletin of NTUU "KPI"*, 3(15), 45–53 [in Ukrainian].
8. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. ISBN 978-617-7468-53-9 [in Ukrainian].
9. Petrenko, V.I., Tarasenko, L.M., & Rudenko, A.O. (2019). Models for analysis and classification of satellite communication channels under interference conditions. *Scientific Notes of the NAS of Ukraine*, 5(27), 72–80 [in Ukrainian].
10. Bayrachny, O.V., & Sydorenko, P.O. (2022). Application of neural networks for time series processing in radio monitoring systems. *Control, navigation and communication systems*, 3(67), 89–97 [in Ukrainian].

*The article was received 23.12.2024 and was accepted after revision 04.03.2025*

### **Триснюк Василь Миколайович**

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** [trysnyuk@ukr.net](mailto:trysnyuk@ukr.net)

### **Сгоров Володимир Олександрович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

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

UDC 004.4

**Oleksii Noskov**, postgraduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6729-0538> **e-mail:** [a33211noskov@gmail.com](mailto:a33211noskov@gmail.com)

**Mykyta Myrontsov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2830-8803> **e-mail:** [myrontsov@ukr.net](mailto:myrontsov@ukr.net)

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

## IMPLEMENTATION OF NEURAL NETWORK BASED 2D SEISMIC IMAGES SUPER RESOLUTION APPROACH

**Abstract.** *In the modern geological exploration process, involvement of seismic interpretation data has long become an everyday norm. The quality of field data and the migration procedure plays a key role in determining the geological structure of the area and the distribution of reservoirs. As an example of seismic survey materials post-processing, a mathematical model of machine learning based on a neural network based on U-net architecture was developed and programmatically implemented to increase the resolution and decrease noise value for 2D images based on a synthetic set of training data. The structure of the model was described, and an algorithm was built for preparing migrated seismic data in the standard SEG Y format for processing with the help of the model and reverse conversion into the input format.*

**Keywords:** *machine learning model, neuron network, seismic, 2D U-net architecture, loss function.*

**О.В. Носков, М.Л. Миронцов**

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

## ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБІЛЬШЕННЯ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МІГРОВаних СЕЙСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ 2Д СЕЙСМІЧНИХ ЗЙОМОК ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

**Анотація.** *В сучасному геологорозвідувальному процесі залучення даних сейсмічної інтерпретації давно стало повсякденною нормою. Якість польових даних та процедури міграції грає ключову роль у визначенні геологічної будови площі та розповсюдженні колекторів. У якості процесу пост-обробки матеріалів сейсмічної зйомки було розроблено і програмно реалізовано математичну модель машинного навчання на базі нейронної мережі архітектури U-net для збільшення роздільної здатності і збільшення значення сигнал/завада для 2D зображень на основі синтетичного набору тренувальних даних. Описано будову моделі, побудовано алгоритм для підготовки мігрованих сейсмічних даних у стандартному форматі SEG Y для опрацювання за допомогою моделі і зворотною конвертацією у вхідний формат.*

**Ключові слова:** *модель машинного навчання, нейронна мережа, сейсміка, 2D U-net архітектура, функція втрат.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.139-145>

## Вступ

За останні десятиріччя із розвитком обчислювальних технологій суттєво змінився процес геологічного пошуку вуглеводнів. Ключову роль в процесі пошуку та розвідки нових нафтогазових покладів відіграє побудова геолого-технологічної 3D моделі досліджуваної площі, яка спирається на сейсмічні дані [1] і без якої зараз важко уявити процес закладання свердловин. На жаль, в переважній кількості випадків, якість сейсмічних даних не є оптимальною для вирішення поставленої задачі [2]. Для цього є низка причин:

- Один зі основних нафтогазових басейнів України, Дніпровсько-Донецька западина, розташований в щільно заселеній частині країни;
- Для ведення робіт з дорозвідки родовищ суттєвий вплив на якість сейсмічних даних чинить антропогенний фактор інфраструктури будь-якого активного родовища;
- Різні якість польових матеріалів та міграції сейсмічних зйомок, що призводить до зменшення співвідношення сигнал/завада.

**Мета представленої роботи** – створення і тренування нейронної мережі, для збільшення якості мігрованих сейсмічних даних, що підвищує якість і ефективність робіт з сейсмічної інтерпретації та геологічного моделювання площі досліджень.

Якість геологічних структурних побудов, а також розповсюдження колекторських властивостей гірських порід – основні задачі, які ставляться на етапі сейсмічної інтерпретації.

Вирішення цих задач напряму залежить від якості як свердловинного матеріалу, так і мігрованих сейсмічних даних. Вирішенню задачі покращення інформативної частини сейсмічних даних світовими вченими присвячено низку наукових праць (зокрема [3-5]), проте більшість із них сфокусовані на дослідженні геологічних умов, що сильно відрізняються від наявних в Україні за глибиною залягання і характером зйомки. У вирішенні подібних задач прийнято обирати з двох варіантів – або обирати максимально «чистий» набір сейсмічних даних, з мінімальним вмістом зашумлених зон, або створювати синтетичний набір даних і штучно вносити в нього шумові завади. З точки зору адаптивності до різних умов осадконакопичення – як в латеральному, так і вертикальному сенсі, перший варіант видається менш адаптивним, бо він описує одні конкретні умови седиментації, у той час як синтетичний набір може вмщати будь-які варіації геологічних умов. Саме тому дана робота спирається на останній варіант вхідних даних для вирішення цих задач за допомогою використання згорткових нейронних мереж [6] (НМ), що набули широкого розвитку за останні роки.

Для вирішення першої частини задачі [7] було згенеровано 800 синтетичних сейсмічних кубів, з яких було екстраговано 3200 різних 2D зображень, які і сформували базу даних для навчання моделі.

**Архітектура нейронної мережі.** Із проаналізованих на етапі відбору архітектур нейронних мереж для роботи із зображеннями, що зарекомендували себе впродовж останніх років, можна виділити U-net та XPixel [8]. Проте їх порівняльний аналіз вказує на неможливість використання для поточних цілей мережі на базі XPixel.

Для побудови моделі нейронної мережі було використано варіант архітектури U-net, який схематично зображено на рис. 1. Варіант саме U-net

було обрано через те, що він не змінює геометрію об'єктів в межах малюнку, а тому сейсмічні зображення, треновані даною мережею, матимуть ту саму ступінь достовірності, як і похідні сейсмічні дані, включаючи їх вертикальні і латеральні обмеження з точки зору роздільної здатності.

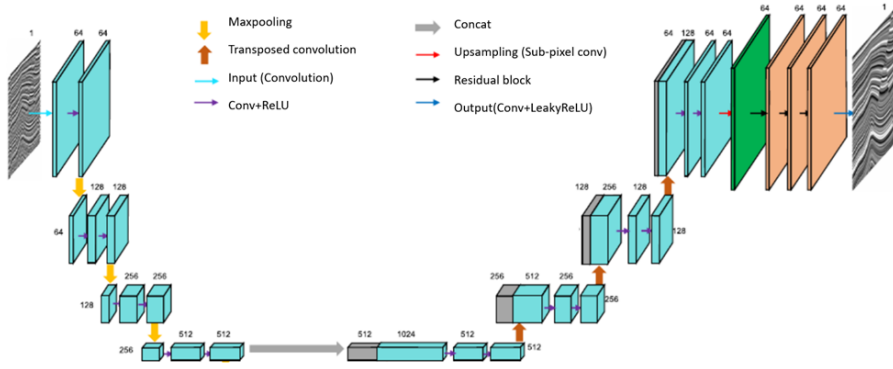


Рис. 1. Схематична будова використаної нейронної мережі

Використана мережа в своїй будові має 3 блоки кодувальника та 3 блоки декодувальника, які поєднуються зв'язковим блоком, що функціонально потрібний для переносу вхідної інформації до шарів декодера (Upsampling layers) для захвату та збереження ключових паттернів, навчених в попередніх шарах, забезпечуючи тим самим факт, що інформація буде правильно відтворена в послідуючих. Структурно рівень зв'язковий блок складається з параметрів, які можна навчити і які дозволяють моделі адаптувати та точно налаштувати своє внутрішнє представлення на основі характеристик даних. Він діє як важлива ланка, підвищуючи здатність моделі вивчати ієрархічні та складні функції [9]. З огляду на те, що мета моделі – фільтрація шумів і збільшення роздільної здатності – досить низькорангові, тобто модель не має на меті запам'ятовування та відтворення складних багатозв'язкових паттернів даних, додавання більшої кількості шарів не є необхідним, бо це призводить до перенавантаження моделі, без якісних змін в результуючому прогнозі.

Для покращення роботи моделі у якості функції активізації було використано модифіковану ReLU (Rectified Linear Unit), а саме leaky ReLU для усунення проблем із зникаючим градієнтом – градієнти для значень більше нуля мають залишатися ненульовими, що забезпечуватиме ефективне поширення градієнтів та оновлення ваги в процесі тренування. Leaky ReLU, як і її похідна функція, активує лише окремі нейрони, залишаючи інші неактивними. Завдяки цьому нейронна мережа може навчатися на більш розріджених уявленнях даних – і знижується ризик перенавчання, що підтверджується отриманою похибкою під час перевірки на нових, небачених мережею даних. Головна відмінність Leaky ReLU від похідної функції – вона не зберігає інформацію про негативні значення, у той час як ReLU їх приводить до нульових значень, що призводить до проблеми «відмираючих нейронів».

Головний недолік обох функцій, а саме – ненормалізованість, було покрито за рахунок нормалізації тренувального та валідаційного наборів.

Статистичними методами обчислювання, спираючись на правило трьох сигм, можна обмежити граничні значення амплітуд мігрованих сейсмічних даних, замінивши їх граничними показниками значення  $\sigma$ . До прикладу,  $\sigma = 0,7$  замінює екстремальні значення на  $0,7 \sigma$ , відсікаючи таким чином екстремальні значення у плаваючому вікні. Дана методика дозволяє концентруватись не на абсолютних значеннях даних у вікні аналізу, а на шаблонах їх поведінки, що і є метою застосування моделі ШІ.

Тестування алгоритму із застосуванням даної методики вказує на зростання роздільної здатності та покращення якості прогнозного сейсмічного матеріалу із застосуванням із досить високим граничним значенням  $\sigma = 1,5$  через те, що екстремальні значення амплітуди в хвильовому полі відповідають породам обмеженого розповсюдження по розрізу – вапнякам, ангідридам, солям, які мають досить локальне розповсюдження в межах сейсмічної зйомки.

**Огляд використаних функцій втрат.** При побудові мережі ШІ у якості функції втрат були розглянуті наступні варіації розповсюджених рішень для роботи з зображеннями: PSNR, MSE, ssim, ms-ssim.

PSNR (peak signal-noise response) – пікове співвідношення сигнал/завада означає співвідношення між максимумом значення сигналу (в нашому випадку – нормованого) і потужністю шуму, що його спотворює. Мережа може навчатися за допомогою PSNR функції втрати, яка поєднує втрати  $\ell_1$  і втрати MS-SSIM. Завдяки перевагам у покращенні продуктивності та конвергенції над середньоквадратичною помилкою (MSE) або  $\ell_2\_loss$  [8],  $\ell_1\_loss$  широко використовується для збільшення роздільної здатності зображень. Математично втрата  $\ell_1$  визначається як:

$$\mathcal{L}^{\ell_1} = \frac{1}{N} \sum_{i,j} |I_{SR}(i,j) - I_{HR}(i,j)|,$$

$N$  – кількість пікселів,  $I_{SR}$  – зображення низької роздільної здатності,  $I_{HR}$  – зображення високої роздільної здатності.

Нейронна мережа, що була навчена використовувати виключно  $\ell_1\_loss$ , генеруватиме зображення високої роздільної здатності зі згладженими текстурами, що не є прийнятними для подальшого процесу робіт із сейсмічної інтерпретації через втрату виразності сейсмічного відгуку [7], що локально розташовані в хвильовому полі. Причина полягає в тому, що  $\ell_1\_loss$  мінімізує єдину піксельну відстань між результатом навчання моделі і метою та ігнорує текстурні елементи. Математично PSNR відображається наступним чином:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{MAX_I^2}{MSE} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right).$$

Ssim (Structural Similarity Index metric) – Індекс структурової подібності є одним із методів вимірювання подібності між двома зображеннями. Дана функція – метод повного співставлення, де контроль якості проводиться на основі вхідного зображення і напряму залежить від його якості. Особливістю метода є урахування не тільки положення пікселів, а і структурної зміни інформації. Ідея полягає в тому, що близько розташовані пікселі мають сильний взаємозв'язок. Ця залежність несе важливу інформацію про структуру

об'єктів та загальну компоновку. SSIM метрика розрахована на різні розміри вікна. Різниця між двома вікнами  $x$  та  $y$ , що мають однаковий розмір  $N \times N$ :

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}.$$

Ms-ssim (multi-scale structural similarity index metric) – розширена метрика Ssim, яка здійснює оцінку подібності одночасно в кількох різних масштабах зображення [10]. Механізм роботи полягає в розбитті зображення на кілька масштабів, де для кожного масштабу розраховується Ssim індекс. Остаточний Ms-ssim індекс розраховується як середнє значення Ssim індексів на різних масштабах.

Первинно PSNR, Ms-ssim та Ssim є додатними зростаючими метриками, але для цілей навчання нейронної мережі було створено функції втрат на основі цих метрик, перевівши їх у площину від'ємних значень.

Для покращення прогнозної якості моделі було скомбіновано  $\ell_1$  loss та Ms-ssim функції втрат. В математичному вигляді фінальну функцію втрат можна представити як:

$$\mathcal{L}^{mix} = \alpha * \mathcal{L}^{ms-ssim} (1 - \alpha) * \mathcal{L}^{\ell_1},$$

де

$$\mathcal{L}^{ms-ssim} = 1 - MS - SSIM(lsr, lhr),$$

$\alpha$  – вага функції втрат.

**Трансформація сейсмічних даних та застосування моделі.** Одним із головних обмежень даного проєкту є застосування попередньо сформованого набору даних для навчання моделі з фіксованими розмірами. Дані з публічного репозиторія [7] були сформовані у вигляді 2Д зображень розмірністю 256x256 пікселів.

Реальні 2Д сейсмічні зображення за замовчуванням не мають якогось попередньо визначеного фіксованого розміру, тому частиною роботи була адаптація вхідних сейсмічних даних до розміру тренованої моделі III.

Під час застосування моделі III є дві базові стратегії поведінки – не вказувати розмір вікна для зчитування, що розтягне модель на все вікно обробки даних, і, відповідно, розбити вікно на блоки за розміром моделі. Під час тестування перший варіант дав доволі поганий результат через різницю масштабів моделі III і реальних даних, тобто один розріз сейсмічного куба містить набагато більше інформації, ніж невеликий зразок синтетичних даних, і тому рівень узагальнення за результатами тренування надвисокий, що не є вирішенням поставленої задачі. Таким чином, залишається другий варіант – подрібнення вікна аналізу на блоки за розміром моделі. Подібний поділ дозволяє дотримуватись співвідношення реальних/синтетичних даних 1:1, що виключає проблему узагальнення, але натомість викликає проблему крайових зон двох сусідніх блоків і їх коректного поєднання (рис. 2).



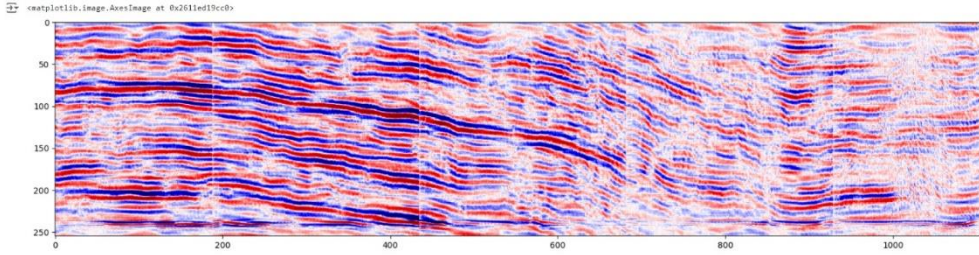


Рис. 2. Фрагмент 2Д профіля з ефектом крайових зон після застосування моделі ШІ

Було заміряно товщину вказаних крайових зон – вона становить по 3 пікселі з кожного боку. Найпростішим варіантом її позбавлення є видалення по 3 пікселі з кожного краю вікна прогнозу моделі з екстраполяцією нових крайових значень на товщину видаленого простору. Незначні артефакти такого підходу залишаються, але на достовірність сейсмічних побудов із застосуванням результату прогнозу ШІ вони вже не впливають.

## Висновки

На базі публічних синтетичних даних побудовано нейронну мережу, а також підбрано оптимальні налаштування її блокової будови і функції втрат, що ефективно збільшує співвідношення сигнал/завада для мігрованих 2Д сейсмічних даних. Розроблено алгоритм розбиття 2Д зображень на блокові зони за розміром вікна аналізу моделі ШІ і послідувочої генерації єдиного датафрейму з оброблених моделлю вхідних даних початкового розміру та геометрії. Застосування моделі ШІ до мігрованих даних збільшує можливості з сейсмічної інтерпретації площ досліджень, а також пришвидшує роботу інтерпретаторів за рахунок активнішого застосування інструментів автоматичного/напівавтоматичного трасування горизонтів відбиття.

## REFERENCES

1. M. Hauzan Nabhan (2024). Analysis of Geological Structure based on 3D Virtual Outcrop Model and Physical Properties of Rocks in Wringinanom District, Gresik Regency. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1307(1):01, 2024. DOI: 10.1088/1755-1315/1307/1/012024
2. Nascimento, A. et al. (2023). Well-velocity variogram sensibility analysis when building geologically constrained velocity models for onshore seismic data. *Conference: 18th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, 2023. [https://www.researchgate.net/publication/374582482\\_Well-velocity\\_variogram\\_sensibility\\_analysis\\_when\\_building\\_geologically\\_constrained\\_velocity\\_models\\_for\\_onshore\\_seismic\\_data#full-text](https://www.researchgate.net/publication/374582482_Well-velocity_variogram_sensibility_analysis_when_building_geologically_constrained_velocity_models_for_onshore_seismic_data#full-text)
3. Zhang, Y.-G., Wang, Y., and Yin, J.-J. (2010). Single point high density seismic data processing analysis and initial evaluation. *Shiyou Diqu Wuli Kantan (Oil Geophys. Prospecting)*, 45 (2), 201–207. [https://www.researchgate.net/publication/289786249\\_Single\\_point\\_high\\_density\\_seismic\\_data\\_processing\\_analysis\\_and\\_initial\\_evaluation](https://www.researchgate.net/publication/289786249_Single_point_high_density_seismic_data_processing_analysis_and_initial_evaluation)
4. Xiao, F. et al. (2014). High-density 3D point receiver seismic acquisition and processing – a case study from the Sichuan Basin, China. *First Break*, 32 (1), 2014. DOI: <https://doi.org/10.3997/1365-2397.32.1.72598>

5. Rebert, T., Sablon, R., Vidal, N., Charrier, P., and Soubaras, R. (2012). Improving pre-salt imaging with variable-depth streamer data. In *Proc. SEG Tech. Program Expanded Abstr.*, Sep. 2012, (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1190/segam2012-1067.1>
6. Yang, J., Zhang, Y., Yu, Y. (2021). Nested U-Net Architecture Based Image Segmentation for 3D Neuron Reconstruction. *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1166/jmihi.2021.3379>
7. Wu, X., Liang, L., Shi, Y., and Fomel, S. (2019). FaultSeg3D: Using synthetic data sets to train an end-to-end convolutional neural network for 3D seismic fault segmentation. *Geophysics*, 84 (3), IM35–IM45, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1190/geo2018-0646.1>
8. Chao Dong, Chen Change Loy, Kaiming He, Xiaoou Tang (2016). Image Super-Resolution Using Deep Convolutional Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (Volume: 38, Issue: 2, 01 February 2016). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1501.00092>
9. Wu, X., Geng, Z., Shi, Y., Pham, N., Fomel, S., and Caumon, G. (2020). Building realistic structure models to train convolutional neural net-works for seismic structural interpretation. *Geophysics*, 85(4), WA27–WA39, Jul. 2020. DOI: 10.1190/geo2019-0375.1
10. Wang, Z., Simoncelli, E.P., Bowik, A. (2003). “Multi-scale structural similarity for image quality assessment. *The Thrity-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, 2003. DOI: 10.1109/ACSSC.2003.1292216

*The article was received 12.12.2024 and was accepted after revision 03.03.2025*

*Стаття надійшла до редакції 12.12.2024 і прийнята до друку після рецензування 03.03.2025*

#### **Носков Олексій Вікторович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ  
Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6729-0538> **e-mail:** a33211noskov@gmail.com

#### **Миронцов Микита Леонідович**

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України  
Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2830-8803> **e-mail:** myrontsov@ukr.net

УДК 502.51:504.5

**Taras Volynets**, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9152-4680> **e-mail:** [alhimiktv@ukr.net](mailto:alhimiktv@ukr.net)

**Dmytro Mosiichuk**, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3864-1019> **e-mail:** [deusplus@gmail.com](mailto:deusplus@gmail.com)

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

## INFORMATION SYSTEMS FOR OBSERVATION OF MARINE AQUATORIES AND ADJACENT AREAS USING AEROSPACE TECHNOLOGIES

**Abstract.** *The work is devoted to solving the scientific and practical problem of developing information systems for monitoring marine waters and adjacent areas using remotely piloted aircraft. The purpose of the study is to improve the level of the information system for monitoring the state of marine waters and coastal zones by improving the technological process and on-board equipment of remotely piloted aircraft. Basic studies show that more than 60% of pollutants entering the Black Sea come from river runoff, covering the territory of almost 20 countries, including the most industrialized regions of Europe. The main source of anthropogenic impact on the northwestern waters of the Black Sea within Ukraine is the runoff of the main European rivers – the Dnieper, Danube, Dniester and Southern Bug, which transport more than 296 km<sup>3</sup> of water annually. In addition, the quality of coastal waters depends on pollution resulting from military actions of Russian aggression, local sources of pollution, in particular the activities of large coastal cities, industrial enterprises, municipal wastewater, stormwater flows, as well as the activity of port infrastructure. Despite the stabilization of the level of oil pollution in the waters of Ukrainian ports at the maximum permissible values (0.05 mg/l), bottom sediments continue to accumulate harmful elements, which requires constant monitoring and improvement of control methods.*

*Information support for the management of environmental safety of the territorial waters of Ukraine in the Black Sea can be effectively provided through an integrated infrastructure of satellite geoinformation resources. The topographic basis of this system is vector maps of the Black Sea regions and the Black Sea water area at a scale of 1:200.*

*Within the framework of this GIS, methodological and software-algorithmic support has been created for the synthesis of thematic geomodels that reflect the man-made loads on the Azov-Black Sea basin, as well as the spatial distribution of indicators of the impact of marine water areas and their ecological state.*

*During the study, scientific and methodological approaches were developed that improve the procedure for environmental monitoring using UAV elements, ensuring the operational functioning of pollutants in a specific area.*

*The results of the study will contribute to increasing the efficiency of environmental monitoring of the Black Sea, ensuring prompt detection of pollution and developing measures to minimize it, which is important for preserving the ecosystem of the region.*

**Keywords:** *information technologies, ecosystem, marine waters, geographic information systems, control system, military influence, spectral channels, remote methods.*

Т.В. Волинець, Д.І. Мосійчук

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

## ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЙ ТА ПРИЛЕГЛИХ ЗОН З ВИКОРИСТАННЯМ АЕРОКОСМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

***Анотація.** Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання, що полягає в розробці інформаційних систем спостереження морських акваторій та прилеглих зон з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів. Метою дослідження є підвищення рівня інформаційної системи моніторингу стану морських акваторій та прибережних зон шляхом удосконалення технологічного процесу та бортового устаткування дистанційно пілотованих літальних апаратів. Основні дослідження свідчать, що понад 60% забруднюючих речовин, які потрапляють у Чорне море, надходять із річкових стоків, що охоплюють територію майже 20 країн, зокрема найбільш індустріалізованих регіонів Європи. Основним джерелом антропогенного впливу на північно-західні акваторії Чорного моря в межах України є стік основних європейських річок – Дніпра, Дунаю, Дністра та Південного Бугу, які транспортують понад 296 км<sup>3</sup> води щороку. Крім того, якість прибережних вод залежить від забруднення внаслідок військових дій російської агресії, місцевих джерел забруднення, зокрема діяльності великих приморських міст, промислових підприємств, муніципальних стічних вод, зливових потоків, а також активності портової інфраструктури. Попри стабілізацію рівня нафтових забруднень в акваторіях українських портів на гранично допустимих значеннях (0,05 мг/л), донні осади продовжують накопичувати шкідливі елементи, що потребує постійного моніторингу та вдосконалення методів контролю.*

*Результати дослідження сприятимуть підвищенню ефективності екологічного моніторингу Чорного моря, забезпеченню оперативного виявлення забруднень та розробці заходів для їхньої мінімізації, що є важливим для збереження екосистеми регіону.*

***Ключові слова:** інформаційні технології, екосистема, морські акваторії, геоінформаційні системи, система керування, військовий вплив, спектральні канали, дистанційні методи.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.146-154>

### Вступ

Чорне море залишається об'єктом стратегічних інтересів України, що набуває більшої важливості в умовах російської агресії, яка не тільки спричиняє збройне протистояння, але й створює додаткові екологічні та геополітичні виклики. Завдяки розвинутим внутрішнім і зовнішнім транспортним зв'язкам через порти Одеси, Іллічівська, Південного, Миколаєва та Херсона Україна зберігає своє ключове положення в регіоні, що набуває особливої актуальності.

Наукові дослідження проводяться на основі державної «Програми охорони та відтворення довкілля Чорного моря», прийнятої Верховною Радою України 22 березня 2001 року. Для ефективної реалізації цієї програми та виконання зобов'язань за Конвенцією необхідно створити сучасну систему фонового,

загального та кризового моніторингу територіального моря та окремої (морської) економічної зони України на Чорному морі, а також забезпечити специфічний антропогенний вплив, що посилюється в умовах військової агресії.

Ефективність цієї системи може бути суттєво підвищена за рахунок застосування результатів тематичного напрямку та сучасних інформаційних підходів.

Розробка та впровадження сучасних технологій моніторингу є необхідними кроками для досягнення ефективного контролю над екологічним станом моря, особливо в умовах, коли території України підлягають навантаженню через антропогенний вплив з боку Росії. Використання геоінформаційних систем (ГІС), супутникових знімків та інших інноваційних інструментів дозволяє оперативно проводити регулярний моніторинг та реагувати на загрози, що виникають. Це дає змогу ефективно проводити аналіз змін у морських акваторіях, визначати рівень забруднення води, оцінювати стан біорізноманіття та рекреаційних зон. Крім того, в контексті російської агресії окрема увага повинна приділятися захисту стратегічно важливих інфраструктурних об'єктів, які розташовані на узбережжі Чорного моря, таких як порти і транспортні шляхи. Заходи зі збереження екологічної безпеки також повинні включати охорону енергетичних ресурсів, результативну боротьбу із забрудненнями і несприятливими змінами природних умов, спричиненими військовими діями. На тлі міжнародної ситуації України, активне співробітництво з іншими країнами – учасниками Конвенції про захист Чорного моря від забруднення, а також з міжнародними екологічними та безпековими організаціями, є елементом у вирішенні проблеми збереження екології Чорного моря в умовах сучасних викликів. Розробка інтегрованих моделей моніторингу та управління природними ресурсами Чорного моря стане успішним інструментом у забезпеченні екологічної безпеки та стійкості всіх приморських регіонів України на фоні агресії сусідньої держави. На сьогодні накопичується досвід використання нових технологій, таких як моніторинг на базі Інтернет-речей (IoT) для збирання статистичних даних у реальному часі, що дозволяє не тільки відслідковувати стан морських екосистем, а й прогнозувати ймовірні екологічні катастрофи, спричинені антропогенними чи військовими впливами. Усі ці інструменти стають критично важливими для збереження природних ресурсів Чорного моря та забезпечення стратегічних інтересів України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні дослідження забруднення українського сектора Чорного моря свідчать про багатофакторний характер антропогенного впливу та підкреслюють нагальну потребу в комплексному моніторингу та управлінні природними ресурсами регіону. Основні висновки аналізу можна узагальнити наступним чином: джерела забруднення та їх вплив. Особливо важливими забрудненнями є нафтопродукти та аварії танкерів. Дослідження після аварій російських танкерів (наприклад, «Волгоневфть-212» та «Волгоневфть-239») вказують на витік тисяч тонн мазуту, що спричинив значне забруднення водної акваторії. Цей інцидент позначився не лише на хімічному складі води, а й на біологічних показниках – токсичні речовини, що містяться в мазуті, можуть впливати на морську фауну, порушуючи її життєдіяльність.

Важливою проблемою, що потребує дослідження, є розробка програмного забезпечення навігації ДПЛА, яке дозволяє цим апаратам виконувати польоти в складі групи, вибирати альтернативні маршрути та здійснювати взаємодію з пунктом управління. Надання спеціалізованих даних ДПЛА дозволяє виокремити найбільш важливі відомості про об'єкти морських акваторій та прибережних зон, що суттєво зменшує обсяг даних, що передаються на інші безпілотники або наземні пункти управління. В Україні одними з провідних науковців у галузі космічних досліджень є: Лялько В.І. [1, 2] – спектральні характеристики рослинного покриву; Попов М.О. – прогнозування врожайності зернових культур за багатоспектральними даними дистанційного зондування Землі; Трофимчук О.М., Красовський Г.Я., Греков Л.Д., Триснюк В.М. [3, 4] – космічний моніторинг забруднення землі; Шумейко В.О., Сметанін К.В., Панас Р.М. – космічний моніторинг деградації ґрунтів [5, 6].

**Мета роботи.** Метою дослідження є підвищення рівня інформаційної системи стану морських акваторій та прибережних зон за рахунок удосконалення технологічного процесу та устаткування бортового обладнання дистанційно пілотованого літального апарата.

**Об'єктом дослідження** є процес застосування геоінформаційних систем спостереження за станом морських акваторій та прилеглих зон з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів.

## **Виклад основного матеріалу дослідження**

Сучасні дослідження свідчать, що понад 60% забруднюючих речовин, які потрапляють у Чорне море, надходять із річкових стоків, які охоплюють територію майже 20 країн, зокрема найбільш індустріалізовані регіони Європи. Таким чином, основним джерелом антропогенного впливу на північно-західні акваторії Чорного моря в межах України є стік основних європейських річок, зокрема Дніпра, Дунаю, Дністра та Південного Бугу, які транспортують понад 296 км<sup>3</sup>.

На якість прибережних вод впливають і місцеві джерела впливу: великі приморські міста, скиди від промислових підприємств, муніципальні стічні води, дощові та зливові стоки з прилеглих територій, а також активність портової інфраструктури, включаючи судноплавство, судноремонтні та суднобудівні підприємства, якісні стоянки й заходи з днопоглиблення. Хоча в акваторіях українських портів за останні роки рівень нафтових забруднень стабілізувався на гранично допустимих значеннях (0,05 мг/л), донні осади продовжують нагромаджувати шкідливі елементи.

Сучасна інформаційна підтримка прийняття рішень для формування комплексу природоохоронних заходів, спрямованих на забезпечення національних та міжнародних стандартів екологічної безпеки акваторій територіальних вод і морської економічної зони українського Чорного моря, ґрунтується на комплексному аналізі даних про геопросторові та технологічні параметри, що представляють стан морських екосистем (рис. 1). Сьогодні основою методології синтезу такої бази даних є високотехнологічні ПС-платформи та сучасні методи тематичного дешифрування.

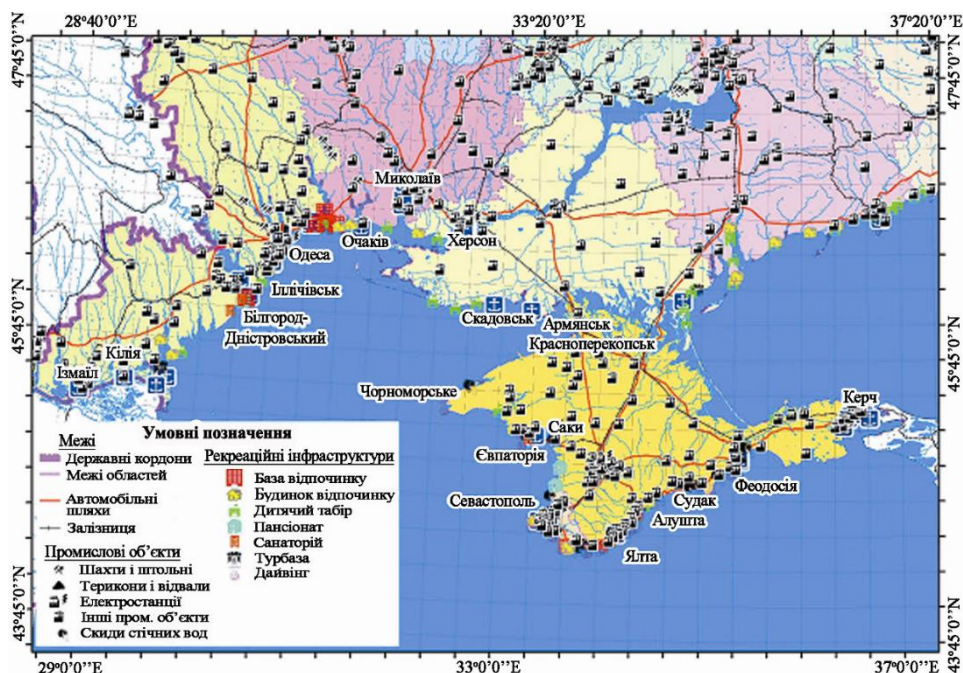


Рис. 1. Техногенне навантаження прибережних територій українського сектору Чорного моря

За допомогою цих ГІС-технологій можна створювати інтерактивні картографічні моделі, які детально відображають просторовий розподіл об'єктів і встановлені між ними зв'язки на базі даних, отриманих ефективними методами моніторингу, а також включають інформацію про техніко-економічні характеристики об'єктів.

Узагальнена математична модель синтезу системи мобільного екологічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон із застосуванням аерокосмічних технологій враховує як збирання даних з різних сенсорних каналів (супутникові знімки, дані з безпілотників, стаціонарні вимірювання), так і їхні вдосконалення.

Система моніторингу морських акваторій та прибережних зон включає – підсистему збору даних, підсистему обробки даних та спостереження.

Прояви впливів цих чинників на екологічний стан морських вод можна реалізувати в режимі його моніторингу. Як уже зазначалося вище, сучасна концепція моніторингу екологічних показників стану морських вод базується на методах ДЗЗ.

У створеній спеціалізованій інтерактивній системі ці методи залучені до вирішення завдань синтезу картографічних моделей зон впливу на екологічні показники морських вод не тільки чинників їх техногенного навантаження в сталих і аварійних режимах їх функціонування, а й природних процесів [7, 8]:

- абразії берегів;
- виносу річкового і поверхневого стоку з урбанізованих територій;
- евтрофікації морських вод.



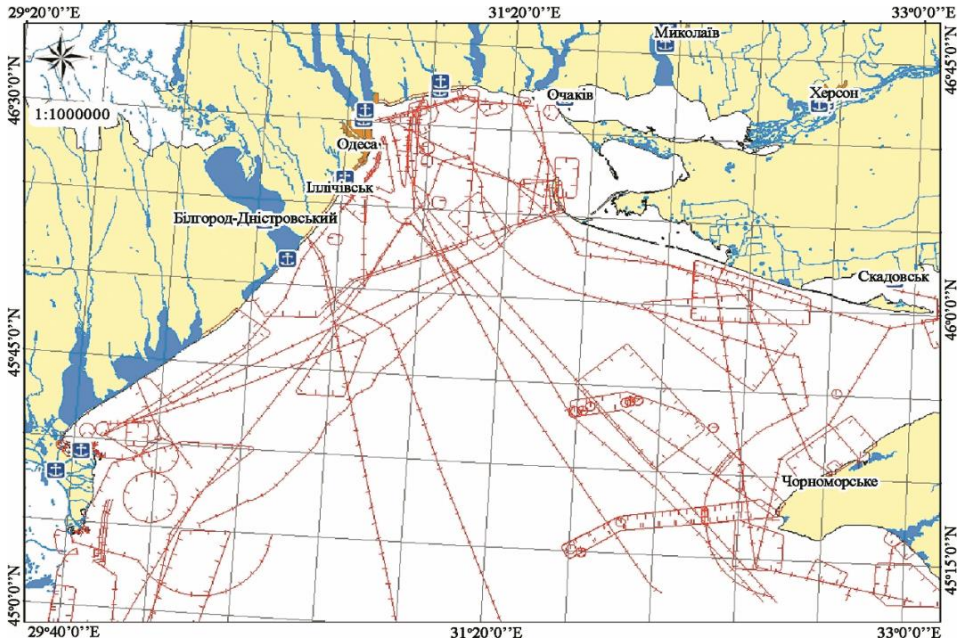


Рис. 2. Просторовий розподіл чинників техногенного навантаження північно-західної частини Чорного моря

Для цього залучалися космічні знімки повної лінійки роздільності з широким діапазоном оперативності, від декількох десятків хвилин (знімки NOAA, геопортал <http://www.saa.noaa.gov>) до декількох десятків діб (знімки надвисокого розрізнення QuickBird, Ikonos, Aster і деяких інших) (рис. 3).

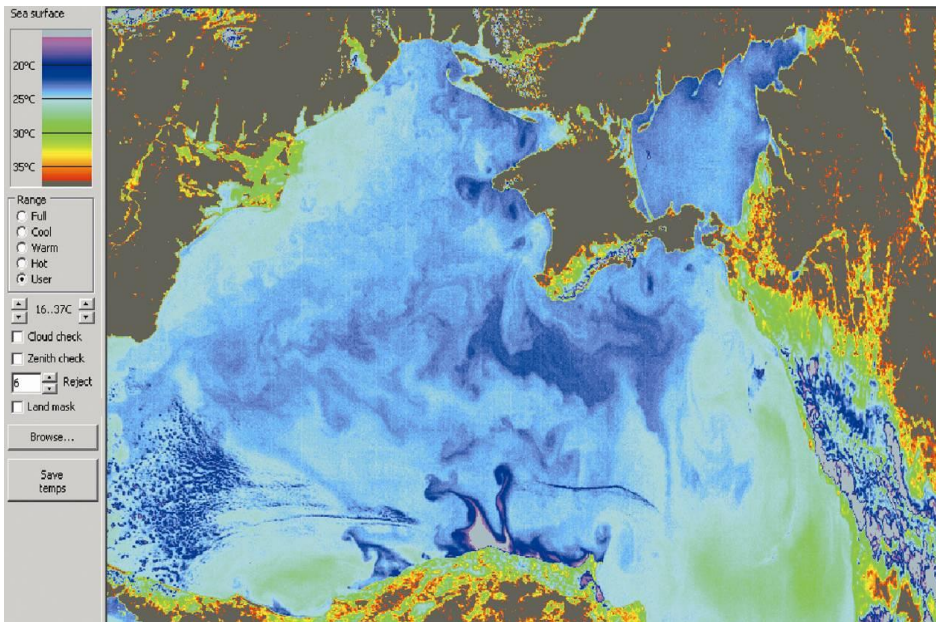


Рис. 3. Розподіл температур поверхні Чорного моря – знімок NOAA



Тематичним дешифруванням подібних знімків синтезуються картографічні моделі просторового розподілу забруднень морських акваторій під впливом техногенних або природних чинників. Теоретичне підґрунтя такого дешифрування базується на аналізі просторового розподілу зональних яскравостей водної поверхні, підлеглих впливу зважених речовин на глибину формування зворотного дифузного розсіювання, або поверхневими плівками, наприклад нафтою або нафтопродуктами [7, 8]. Наявність суттєвих розбіжностей у розподілі яскравостей водних поверхонь з аномальними концентраціями зважених речовин різного походження у визначених ділянках оптичного діапазону ілюструє рис. 4. Саме за рахунок цих розбіжностей можна синтезувати картографічні моделі забруднених морських акваторій під впливом техногенних і природних чинників (рис. 4).

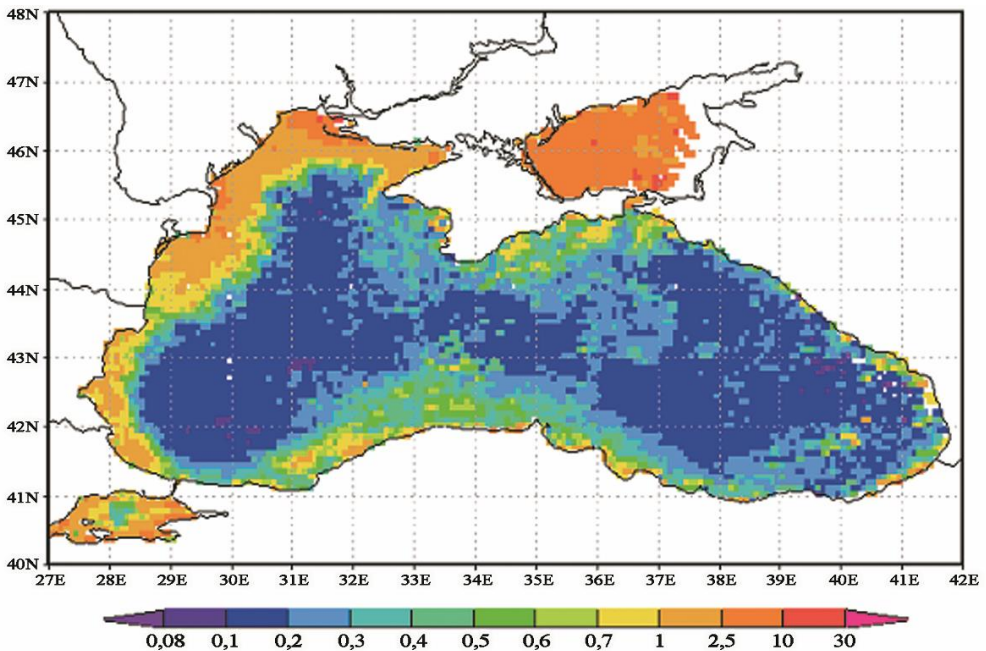


Рис. 4. Просторовий розподіл хлорофілу в Чорному морі 28.07.2024

## Висновки

Інформаційна підтримка управління екологічною безпекою територіальних вод України в Чорному морі може бути ефективним забезпеченням через інтегровану інфраструктуру супутникових геоінформаційних ресурсів. Топографічною основою цієї системи є векторні карти причорноморських областей та акваторії Чорного моря масштабу 1:200.

В межах цієї ГІС створено методичне та програмно-алгоритмічне забезпечення для синтезу тематичних геомodelей, які відображають техногенні навантаження на Азово-Чорноморський басейн, а також просторовий розподіл показників впливу морських акваторій та їх екологічного стану.

У ході дослідження розроблено науково-методичні підходи, що вдосконалюють процедуру екологічного моніторингу з використанням елементів БПЛА, забезпечуючи оперативне функціонування забруднювачів на визначеній території. Для вирішення наукових завдань комплексно застосовано метод спостереження (польові дослідження), системний підхід, методи структурного та параметричного аналізу, теорію та методи оптимізації, теорію управління та методи статистичної обробки результатів. Під час експерименту, поряд з аналітичними розрахунками, використовувалося імітаційне моделювання на базі спеціалізованого програмного комплексу MatLab 8.1, що дозволило сформулювати та вважати реалістичним завдання оптимального польоту БПЛА за економічними показниками.

## 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., Hlebochuk, H. [2013]. Mathematical and GIS-modeling of landslides in kharkiv region of Ukraine. *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling*. – Springer, Berlin, Heidelberg. 347-352.
3. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. (2021). Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 343 с. ISBN 978-617-7468-53-9.
4. Машков О.А.; Триснюк В.М.; Мамчур Ю.В.; Жукаускас С.В.; Нігородова С.А.; Курило А.В. Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: наук.-техн. журн. – Івано-Франківськ : Симфонія форте. – 2019. № 1. (19) 2019. С. 69–77. <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/162108/03-Mashkov.pdf?sequence=1>
5. Андреев С.М. Розробка картографічних моделей морських акваторій та прибережних територій з застосуванням геоінформаційних технологій / Андреев С.М., Крета Д.Л., Радчук В.В. // "Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами з надзвичайних ситуацій": матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф. – Київ – Харків – АР Крим, 2008. – С. 112–117.
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., Radlowska, K.O. [2019]. Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.
7. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin. Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018. P. 61–67.*
8. Zaitsev S.V. Method of estimating reliability of information transmission in wireless networks channels increase in noise and interference / S.V. Zaitsev // *International Journal «Information Models and Analyses»*. – Sofia : ITHEA, 2015. – Vol. 4 (1). – P. 87–99.

*Стаття надійшла до редакції 25.11.2024 і прийнята до друку після рецензування 08.02.2025*

## REFERENCES

1. Krasovsky, G.Ya., Trofymchuk, O.M., Kreta, D.L., Klymenko, V.I., Ponomarenko, I.G., & Sukhodubov, O.O. (2005). Synthesis of cartographic models of land pollution by man-made dust using space images. *Ecology and resources*, 12, 37-55 [in Ukrainian].
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., & Hlebachuk, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. In *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347-352). Springer, Berlin, Heidelberg.
3. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. ISBN 978-617-7468-53-9 [in Ukrainian].
4. Mashkov, O.A., Trysnyuk, V.M., Mamchur, Y.V., Zhukauskas, S.V., Nigorodova, S.A., & Kurylo, A.V. (2019). A new approach to the synthesis of restorative control for remotely piloted aerial vehicles for environmental monitoring. *Environmental safety and balanced resource use: science and technology journal*, 1(19), 69-77 [in Ukrainian].
5. Andreyev, S.M., Kreta, D.L., & Radchuk, V.V. (2008). Development of cartographic models of marine areas and coastal areas using geoinformation technologies. In *"Modern information technologies for managing environmental safety, nature use, and emergency measures": materials of the VII int. scientific-practical conf.* (pp. 112-117). Kyiv – Kharkiv – AR Crimea [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 UTPRESS ISSN 1582-0548*, 1, 61–67.
8. Zaitsev S.V. (2015). Method of estimating reliability of information transmission in wireless networks channels increase in noise and interference. *International Journal «Information Models and Analyses»*, 4 (1), 87–99.

*The article was received 25.11.2024 and was accepted after revision 08.02.2025*

### **Волинець Тарас Васильович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору  
Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9152-4680> **e-mail:** [alhimiktv@ukr.net](mailto:alhimiktv@ukr.net)

### **Мосійчук Дмитро Іванович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору  
Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3864-1019> **e-mail:** [deusplus@gmail.com](mailto:deusplus@gmail.com)

УДК 004.8

**Pavlo Krysenko**, Doctor of Philosophy, Research Assistant  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5612-9474> **e-mail:** p.krysenko@gmail.com

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

## THE PROBLEM OF PREDICTION OF THE TRANSMISSION COEFFICIENT USING NEURAL NETWORKS WITH A LIMITED QUANTITY OF DATA

***Annotation.** The article discusses available approaches to predicting the transmission coefficient of metamaterials. In the paper was proposed different approaches that create the possibility of using data from various open sources, as well as the possibility of encoding complete structural information about the composition of metamaterials. A neural network with two inputs was designed, which is based on a three-dimensional convolution operation. Using these approaches, the training of an artificial neural network was carried out, and the results of transmission coefficient prediction were presented. The nature of metamaterial use can be determined by the predicted coefficient, but the resulting root mean square error still does not allow using such a neural network as a substitute for existing approaches. The paper presents an analysis of the obtained results, in which possible approaches to solving the problem of the amount of data are proposed, as well as solving the problem of different intervals of electromagnetic radiation in the dataset using the architecture of a three-dimensional transformer.*

**Key words:** deep learning, low pass filter, convolutional neural networks, metamaterials.

### П. Крисенко

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, м. Київ, Україна

## ПРОБЛЕМАТИКА ПРОГНОЗУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПРОПУСКАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ З ОБМЕЖЕНОЮ КІЛЬКІСТЮ ДАНИХ

***Анотація.** У статті розглянуто наявні підходи до прогнозування коефіцієнта пропускання метаматеріалів. В роботі пропонуються підходи, які створюють можливість використання даних з різних відкритих джерел, а також можливість кодувати повну структурну інформацію про склад метаматеріалів. Було спроектовано нейронну мережу з двома входами, яка заснована на операції тривимірної згортки. Використовуючи ці підходи, було проведено навчання штучної нейронної мережі, представлені результати прогнозування коефіцієнта пропускання. За прогнозованим коефіцієнтом можна визначити характер використання метаматеріалу, але отримана середньоквадратична похибка все ще не дозволяє використовувати таку нейронну мережу як замітник існуючих підходів. В роботі представлено аналіз отриманих результатів, запропоновані можливі підходи до вирішення проблематики кількості даних, а також вирішення проблеми різних проміжків електромагнітного опромінення у датасеті за допомогою архітектури тривимірного трансформера.*

**Ключові слова:** глибоке навчання, фільтр низьких частот, згорткова нейронна мережа, метаматеріали.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.155-163>

## Вступ

Метаматеріали – це штучно створені структури, які мають визначні характеристики через складні та періодичні внутрішні структури. Ці матеріали знайшли широке використання у сучасних приладах та пристроях. Вони активно використовуються для створення лінз та підсилювачів у оптичному та мікрохвильовому діапазонах, а також у пристроях для покращення роздільної здатності джерел випромінення [3, 4]. Також, одним із перспективних напрямків використання метаматеріалів є створення інфрачервоних камуфляжних покриттів від засобів нічного бачення [5, 6].

Сучасне програмне забезпечення для роботи з дизайном метаматеріалів спирається на класичні математичні моделі, які були створені під різні діапазони випромінення. На жаль, не існує універсальних методів для роботи з метаматеріалами, що спираються на класичні математичні моделі.

Зі зростанням обчислювальних потужностей відбулося збільшення використання методів глибокого навчання для створення універсальних розв'язків задач, які до цього розв'язувалися класичними методами. Було запропоновано для вирішення задачі прогнозування властивостей метаматеріалів різні архітектури нейронних мереж [7–9]. В цих дослідженнях метаматеріали розглядалися як двовимірна площина, що зменшує об'єм корисної інформації про структуру метаматеріалу. Інший запропонований підхід – це представлення інформації у вигляді сферичних наночасток, з яких складаються метаатоми. Властивості таких метаатомів використовуються як вхідна інформація для нейронної мережі [10, 11].

Всі описані підходи так чи інакше спрощують інформацію про структуру метаматеріалу та не використовують об'ємну топологію, яка для складних структур може мати надзвичайний вплив на характеристики.

Також, в попередніх роботах не була використана інформація про характеристики електромагнітного опромінення. Електромагнітні метаматеріали мають властивість дисперсії характеристик. Тобто, їх коефіцієнти пропускання, поглинання та відбивання залежать від частоти хвилі.

## Основна частина

Джерелом даних для навчання було обрано низку досліджень [12–16]. Ці роботи були обрані, так як відповідали критеріям:

- 1) визначена та відтворювана топологія метаматеріалів;
- 2) визначені матеріали, з яких були створені зразки;
- 3) однаковий тип експериментальних характеристик;
- 4) визначені параметри електромагнітного опромінення;
- 5) терагерцовий діапазон опромінення та надскладна об'ємна структура для моделювання.

Ці структури та їх розміри зображені на рисунках 1–5 відповідно.

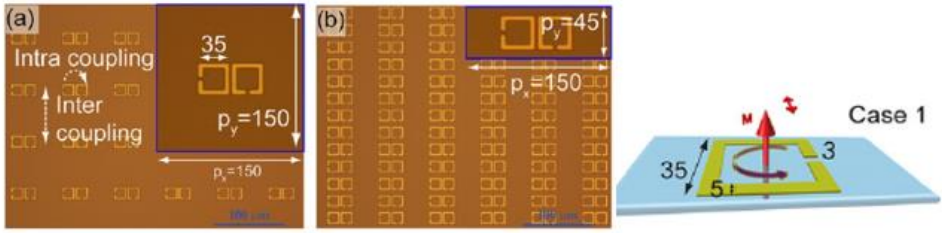


Рис. 1. Схематичний вигляд метаматеріалу – 1 [12]

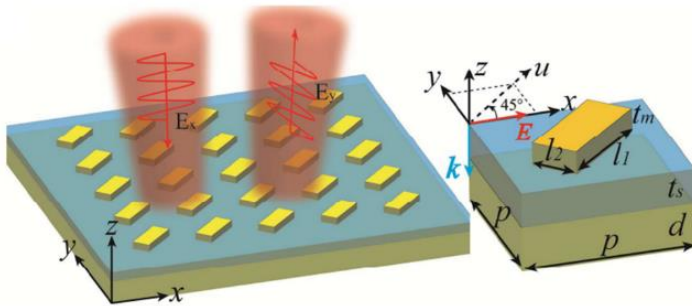


Рис. 2. Схематичний вигляд метаматеріалу – 2 [13]

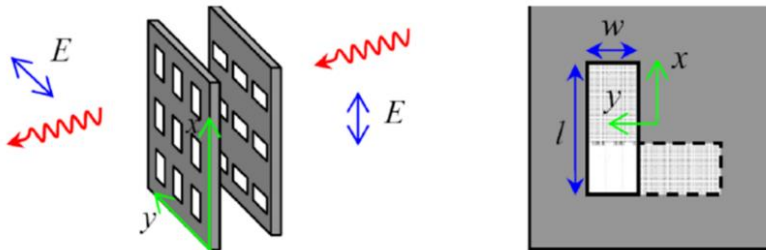


Рис. 3. Схематичний вигляд метаматеріалу – 3 [14]

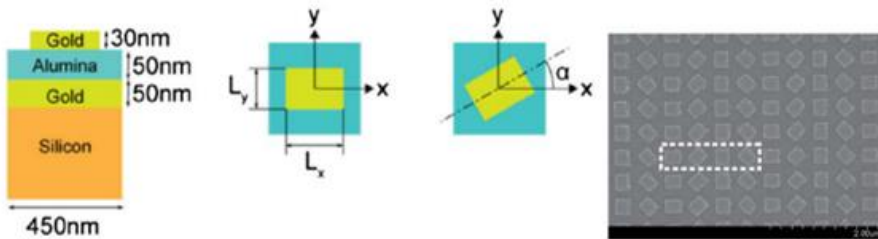


Рис. 4. Схематичний вигляд метаматеріалу – 4 [15]

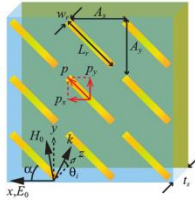


Рис. 5. Схематичний вигляд метаматеріалу – 5 [16]

Інформація про структуру та тип матеріалів представлена у вигляді чотиривимірному тензору розмірністю:

$$X = (x, y, z, p), \tag{1}$$

де  $X$  – вхідний тензор,  $x, y, z$  – координати відповідних осей,  $p$  – канал з характеристиками матеріалу.

В якості характеристик, що однозначно представляють матеріал, були обрані діелектрична проникність, питома провідність та магнітна провідність.

Тобто, кожному елементу у просторі відповідає трійка значень, що однозначно представляють матеріал, з якого побудована внутрішня структура метаматеріалу. Таке представлення топологічної структури можна представити у вигляді об’ємного RGB зображення, де замість RGB каналу знаходиться канал з характеристиками матеріалів.

Для кодування інформації про параметри електромагнітного опромінення можна використати декілька підходів. Одним з таким підходів є додавання параметрів опромінення у вхідний тензор структурного представлення. Цими параметрами виступають тип поляризації електромагнітної хвилі, кут опромінення та коефіцієнт заломлення діелектрика. Додавання такої трійки значень збільшить розмір вхідних даних у 2 рази. Так як значення параметрів електромагнітної хвилі в даних експериментах константні відносно структури метаматеріалу, то використання такого підходу не є оптимальним.

Інший підхід – це представлення параметрів електромагнітного опромінення у вигляді вектора, який буде поданий на додатковий вхід нейронної мережі:

$$c = [pol, \alpha, n], \tag{2}$$

де  $c$  – вектор параметрів електромагнітного опромінення,  $\alpha$  – кут опромінення,  $n$  – коефіцієнт заломлення діелектрика.

Коефіцієнт пропускання залежить від частоти опромінення, тому для прогнозування цього коефіцієнта було обрано 20 точок з таблиці значень експериментів, з однаковим проміжком і для одних і тих самих частот.

Основою архітектури штучної нейронної мережі була обрана тривимірна згортка (операція яка виражається формулою):

$$y(N_i, C_{out_j}) = bias(C_{out_j}) + \sum_{k=0}^{C_{in}^{-1}} weight(C_{out_j}, k) * input(N_i, k), \tag{3}$$

де  $y$  – вихідний чотиривимірний тензор,  $bias$  – матриця зсуву,  $weight$  – ваги згортки,  $input$  – вхідний чотиривимірний тензор.

Архітектура штучної нейронної мережі буде являти собою комбінацію з трьох блоків та представлена на рис. 6. Блок «А» представлений послідовно з'єднаними шарами тривимірної згортки для вивчення структурної топологічної інформації метаматеріалу та представлення цієї інформації у вигляді  $n$ -мірного вектора. Блок «В» – послідовно з'єднані шари повнозв'язної нейронної мережі для знаходження залежності у параметрах електромагнітного опромінення та представлення її у вигляді вектора. Та блок «С» – який на вхід прийматиме векторне представлення структурної інформації з першого блоку, яке об'єднане операцією конкатенації з векторним представленням параметрів електромагнітного опромінення та прогнозуватиме 20 точок значень коефіцієнта пропускання та відповідних їм значень частот.

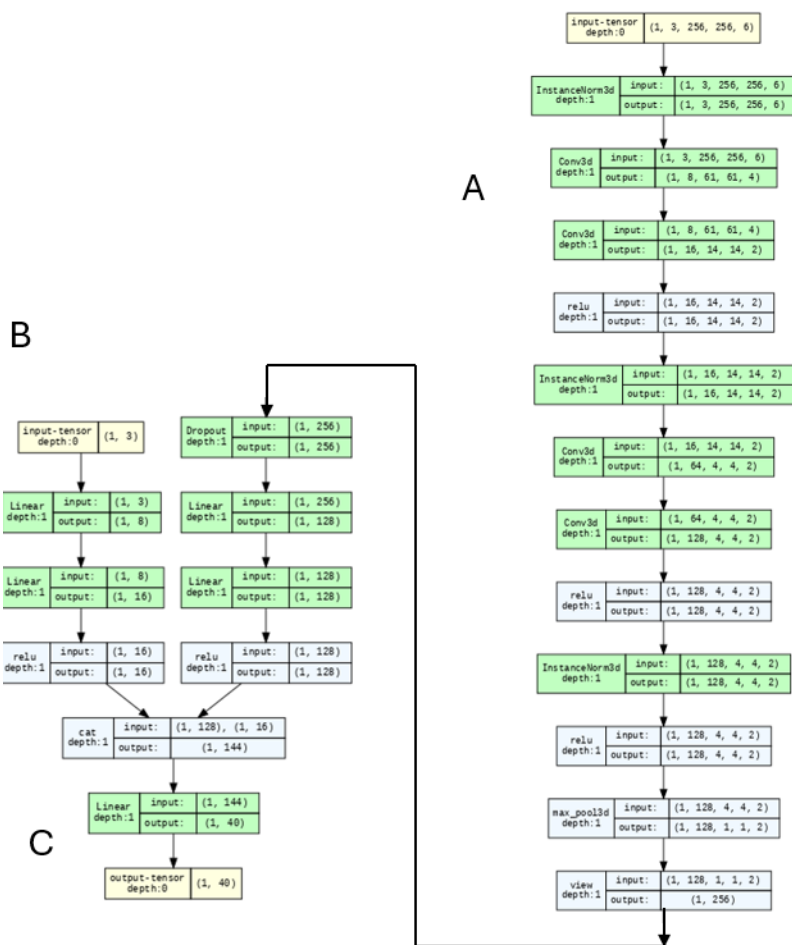


Рис. 6. Архітектура штучної нейронної мережі

Використання додаткової гілки параметрів електромагнітного опромінення збільшує кількість даних для навчання штучної нейронної мережі. У порівнянні з роботою [17] обсяг даних збільшився на 16 семплів, так як з'явилася змога використати одні й ті самі структури для різних параметрів електромагнітного опромінення та різних значень коефіцієнта пропускання для частотного діапазону.



Зібрані дані для навчання були розбиті на три підвибірки даних. Кількість семплів у цих вибірках зазначена у таблиці 1.

Таблиця 1. Кількість даних у вибірках даних

Тренування	Валідація	Тестування
18	4	1

В якості функції помилки для навчання була обрана функція середньоквадратичної похибки.

Алгоритмом навчання був обраний алгоритм NAdam з параметрами по замовчуванню та швидкістю навчання 0.001.

Результати навчання продемонстровані на рис. 7–8. На рис. 7 зображений графік функції помилки, з якого можна побачити, що нейронна мережа здатна навчатися на такому типі даних.

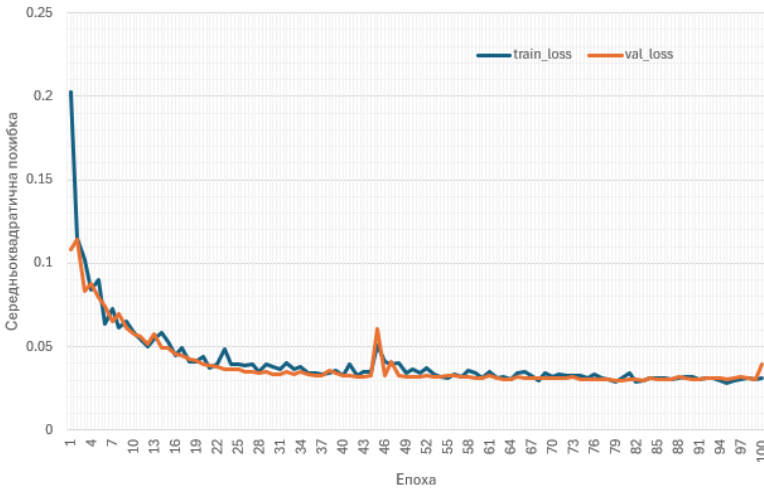


Рис. 7. Графік функції похибки

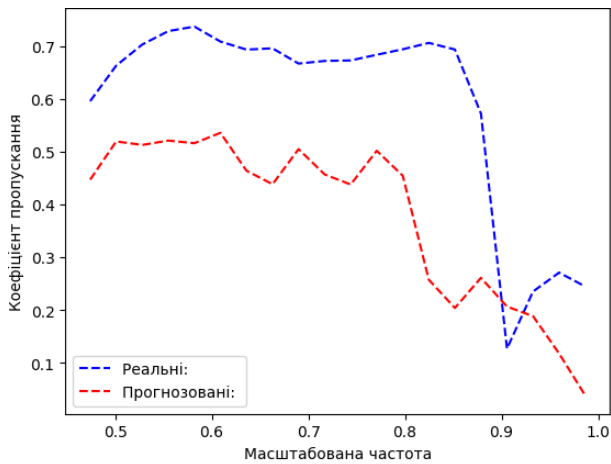


Рис. 8. Порівняння прогнозованого коефіцієнта пропускання та реального

З рис. 8 можна побачити, що нейронна мережа ще не має змоги достатньо добре прогнозувати коефіцієнт пропускання, але за прогнозованим параметром можна визначити характер метаматеріалу, а саме – фільтр низьких частот.

## **Висновки**

У порівнянні з роботою [17] покращилася середньоквадратична похибка прогнозування. Це зумовлено використанням додаткової інформації про параметри електромагнітного опромінення та збільшенням кількості даних.

Запропонована архітектура не використовує значення частоти опромінення. Для застосування цієї інформації можна використати сучасні архітектури, які засновані на механізмі уваги. У роботі [18] був проведений огляд існуючих архітектур Transformer для випадку тривимірного типу даних. Для такої архітектури можливо закодувати інформацію про електромагнітне випромінення у додатковий канал з інформацією про характеристики матеріалів і використати послідовність значень частот як додаткове джерело інформації в блоці перехресної уваги.

Мала кількість даних обумовлена малою кількістю відкритих робіт з дослідження метаматеріалів, що можуть бути використані для створення датасету для навчання. Існує нагальна потреба у подальшій уніфікації даних. В цій роботі були уніфіковані лише параметри електромагнітного опромінення. Використання значень частот опромінення значно розширить діапазон умов для збору даних з відкритих джерел. Можливість використання значень частот описана в попередньому абзаці.

Також, проблемою збору даних є швидкість рендеру тривимірних структур. Всі семпли, які були зібрані для цього експерименту, створені в ручному режимі за допомогою програмного забезпечення Blender. Так як метаматеріали мають періодичну структуру, можна запропонувати алгоритм, що буде генерувати тривимірні структури за заданими елементами, з яких складається метаматеріал. Такий алгоритм значно пришвидшить збір даних, аніж створення структур власноруч у Blender.

Не всі дослідження метаматеріалів мають чітко визначені табличні дані коефіцієнтів пропускання та поглинання, і відбивання. У випадку, коли ціллю дослідження є комплексний пристрій на основі метаматеріалів, ці параметри не завжди вказані для всього діапазону частот. Інформація з таких досліджень поки що ніяк не може бути використана. Так як вхідна інформація все ще може бути отримана з таких досліджень, може бути зібраний датасет для Unsupervised та Self-supervised навчання. Так як інформація про структуру є найбільш складною, то можна запропонувати передбачення замаскованих та квантизованих елементів структури, як це було зроблено для навчання розпізнавання мови з обмеженою кількістю даних у [19].

Збільшення кількості відкритих даних може спонукати інших дослідників до розв'язання цієї задачі. Більш актуальним також є розв'язок зворотної задачі, в якій за заданих характеристик нейронна мережа буде генерувати дизайн метаматеріалів. Для розв'язку такої задачі існує проблема із кількістю даних для навчання, так як такі зворотні задачі потребують значної кількості семплів на навчання у порівнянні із прямою задачею.

## REFERENCES

- [1] Lopez, M., Dupont, T., & Panneton, R. (2023). A mass-spring analogy for modeling the acoustic behaviour of a metamaterial. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 265(1), 6295–6301. [https://doi.org/10.3397/in\\_2022\\_0935](https://doi.org/10.3397/in_2022_0935)
- [2] Porfyrakis, P., & Tsitsas, N. L. (2019). Nonlinear electromagnetic metamaterials: Aspects on mathematical modeling and physical phenomena. *Microelectronic Engineering*, 216, 111028. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.111028>
- [3] Zharov, A. A., Zharova, N. A., Noskov, R. E., Shadrivov, I. V., & Kivshar, Y. S. (2005). Birefringent left-handed metamaterials and perfect lenses for Vectorial Fields. *New Journal of Physics*, 7, 220–220. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/7/1/220>
- [4] Bowers J. A.; Hyde R. A. et al. "Evanescent electromagnetic wave conversion lenses I, II, III" US Patent and Trademark Office, Grant US-9081202-B2, 14 juli 2015, U.S. Patent 9,081,202.
- [5] Zharov, A. A., Zharova, N. A., Noskov, R. E., Shadrivov, I. V., & Kivshar, Y. S. (2005). Birefringent left-handed metamaterials and perfect lenses for Vectorial Fields. *New Journal of Physics*, 7, 220–220. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/7/1/220>
- [6] Ge, L., Li, J., Zhong, K., Wang, Y., Xu, D., & Yao, J. (2023). A thermocouple based on wideband hybrid metamaterial absorber for mid-infrared photo-thermoelectric detector. *Optics Communications*, 545, 129714. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.129714>
- [7] Khatib, O., Ren, S., Malof, J., & Padilla, W. J. (2021). Deep learning the electromagnetic properties of metamaterials – a comprehensive review. *Advanced Functional Materials*, 31(31). <https://doi.org/10.1002/adfm.202101748>
- [8] Hammond, A. M., & Camacho, R. M. (2019). Designing integrated photonic devices using artificial neural networks. *Optics Express*, 27(21), 29620. <https://doi.org/10.1364/oe.27.029620>
- [9] Xu, Y., Zhang, X., Fu, Y., & Liu, Y. (2021). Interfacing photonics with Artificial Intelligence: An innovative design strategy for photonic structures and devices based on Artificial Neural Networks. *Photonics Research*, 9(4). <https://doi.org/10.1364/prj.417693>
- [10] Peurifoy, J., Shen, Y., Jing, L., Yang, Y., Cano-Renteria, F., DeLacy, B. G., Joannopoulos, J. D., Tegmark, M., & Soljačić, M. (2018). Nanophotonic particle simulation and inverse design using artificial neural networks. *Science Advances*, 4(6). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar4206>
- [11] Shi, R., Huang, J., Li, S., Niu, L., & Yang, J. (2022). Forward prediction and inverse design of nanophotonic devices based on Capsule Network. *IEEE Photonics Journal*, 14(4), 1–8. <https://doi.org/10.1109/jphot.2022.3182050>
- [12] Cong, L., Srivastava, Y. K., & Singh, R. (2016). Inter and intra-metamolecular interaction enabled broadband high-efficiency polarization control in metasurfaces. *Applied Physics Letters*, 108(1). <https://doi.org/10.1063/1.4939564>
- [13] Ding, F., Wang, Z., Shalaev, V. M., & Kildishev, A. V. (2015). Broadband high-efficiency half-wave plate using plasmonic metasurface. *CLEO: 2015*. [https://doi.org/10.1364/cleo\\_qels.2015.ftu1c.6](https://doi.org/10.1364/cleo_qels.2015.ftu1c.6)
- [14] Huang, C. (2015). Efficient and broadband polarization conversion with the coupled metasurfaces. *Optics Express*, 23(25), 32015. <https://doi.org/10.1364/oe.23.032015>
- [15] Shaltout, A., Liu, J., Kildishev, A., & Shalaev, V. (2015). Photonic Spin Hall effect in gap-plasmon metasurfaces for on-chip chiroptical spectroscopy. *Optica*, 2(10), 860. <https://doi.org/10.1364/optica.2.000860>
- [16] Grady, N. K., Heyes, J. E., Chowdhury, D. R., Zeng, Y., Reiten, M. T., Azad, A. K., Taylor, A. J., Dalvit, D. A., & Chen, H.-T. (2013). Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction. *Science*, 340(6138), 1304–1307. <https://doi.org/10.1126/science.1235399>

- [17] Zozyuk, M., Koroliouk, D., Krysenko, P., Yurikov, A., & Yakymenko, Y. (2023). Prediction of characteristics using a convolutional neural network based on experimental data on the structure and composition of metamaterials. *Statistics, Optimization & Information Computing*, 11(3), 730–739. <https://doi.org/10.19139/soic-2310-5070-1707>
- [18] Lahoud, J., Cao, J., Khan, F. S., Cholakkal, H., Anwer, R. M., Khan, S., & Yang, M. H. (2022). 3D vision with transformers: A survey. arXiv preprint arXiv:2208.04309.
- [19] Lodagala, V. S., Ghosh, S., & Umesh, S. (2023). CCC-WAV2VEC 2.0: Clustering Aided Cross contrastive self-supervised learning of speech representations. 2022 IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT). <https://doi.org/10.1109/slt54892.2023.10022552>

*Стаття надійшла до редакції 09.12.2024 і прийнята до друку після рецензування 25.02.2025*

*The article was received 09.12.2024 and was accepted after revision 25.02.2025*

**Крисенко Павло**

доктор філософії, молодший науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5612-9474> **e-mail:** [p.krysenko@gmail.com](mailto:p.krysenko@gmail.com)

УДК 502.51:504.5

**Oleksandr Shevchuk**, postgraduate  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3287-8216>  
*e-mail*: [oleksandrshevchuk17@gmail.com](mailto:oleksandrshevchuk17@gmail.com)

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

## **INFORMATION TECHNOLOGIES FOR ENVIRONMENTAL MONITORING OF LANDFILLS USING REMOTELY PILOTED AIRCRAFT**

***Abstract.** The paper proposes an analytical model for assessing the quality of performance of tasks of environmental monitoring of landfills by means of remotely piloted aircraft, the feature of which is taking into account the nature of anthropogenic impact on the state of the environment by improving the environmental monitoring equipment by optimizing the structure and parameters of the aircraft's onboard equipment.*

*An algorithm for controlling an environmental monitoring UAV has been developed, which, unlike existing ones, provides stabilization of the object on the research trajectory and provides increased accuracy in assessing the environmental safety of observation objects by using a communication channel with a remotely piloted aircraft. The purpose of this study is to increase the level of environmental safety of territories affected by landfills by improving technological processes and modernizing the onboard equipment of remotely piloted aircraft.*

*The object of the study is the process of using remotely piloted aircraft in systems for environmental monitoring of landfills. The object of the study is the process of using remotely piloted aircraft in systems for environmental monitoring of landfills.*

*The practical significance of the results obtained is that on the basis of the improved scientific and methodological apparatus of using remotely piloted aircraft in the system of environmental monitoring of landfills, it is possible to build ecological maps of a technogenic nature.*

*This will increase the reliability of the obtained data, determine the nature and properties of anthropogenic zones of influence. The use of remotely piloted aircraft for environmental monitoring allows you to quickly obtain data on the state of the environment, which is critically important for timely detection and response to environmental threats.*

**Keywords:** *information technology, mathematical model, control algorithms, remotely piloted aircraft, modeling accuracy, control system, satellite communication channels.*

---

© O.B. Шевчук, 2025

**О.В. Шевчук**

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

## **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СМІТТЄЗВАЛИЩ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ДИСТАНЦІЙНО ПІЛОТОВАНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

***Анотація.** В роботі запропонована аналітична модель оцінювання якості виконання завдань екологічного моніторингу сміттєзвалищ засобами дистанційно пілотованих літальних апаратів, особливістю якої є урахування характеру антропогенного впливу на стан довкілля за допомогою удосконалення апаратури екологічного спостереження шляхом оптимізації структури та параметрів бортового обладнання літального апарату. Розроблено алгоритм керування ДПЛА екологічного спостереження, який, на відміну від існуючих, забезпечує стабілізацію об'єкта на досліджуваній траєкторії, підвищення точності оцінювання екологічної безпеки об'єктів спостереження за допомогою використання каналу зв'язку з дистанційно пілотованим літальним апаратом. Метою даного дослідження є підвищення рівня екологічної безпеки територій, що зазнають впливу сміттєзвалищ, шляхом вдосконалення технологічних процесів та модернізації бортового обладнання дистанційно пілотованих літальних апаратів. Об'єктом дослідження виступає процес використання дистанційно пілотованих літальних апаратів в системах екологічного моніторингу сміттєзвалищ.*

*Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі вдосконаленого науково-методичного апарату використання дистанційно пілотованих літальних апаратів в системі екологічного моніторингу сміттєзвалищ можна побудувати екологічні карти техногенного характеру. Це дозволить підвищити достовірність отриманих даних, визначити характер і властивості антропогенних зон впливу. Використання дистанційно пілотованих літальних апаратів для екологічного моніторингу дозволяє оперативно отримувати дані про стан навколишнього середовища, що є критично важливим для своєчасного виявлення та реагування на екологічні загрози.*

***Ключові слова:** інформаційні технології, математична модель, алгоритми керування, дистанційно пілотований літальний апарат, точність моделювання, система керування, супутникові канали зв'язку.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.164-172>

### **Вступ**

Одним із перспективних підходів до здійснення екологічного моніторингу є дистанційний метод, який ґрунтується на комплексному застосуванні космічних, авіаційних та мобільних наземних систем спостереження. Зокрема, в ролі авіаційних платформ використовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА) та дистанційно керовані літальні апарати (ДКЛА).

З огляду на антропогенний вплив на природу, постійні зміни навколишнього середовища під впливом промислових об'єктів, а також змінні параметри атмосфери Землі, виникає потреба у надійному виконанні завдань екологічного прогнозування та забезпечення екологічної безпеки через

застосування екологічного моніторингу. Тому розширення можливостей екологічного моніторингу може бути досягнуто шляхом використання мобільних екологічних комплексів, дистанційно керованих літальних апаратів та космічних систем спостереження, із застосуванням дистанційних методів контролю параметрів довкілля. Удосконалення науково-методичних підходів до оцінки стану зон екологічного ризику сприятиме підвищенню ефективності моніторингу та забезпеченню екологічної безпеки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних наукових досліджень та публікацій свідчить про розробку різноманітних методів, механізмів, принципів і методик оцінки стану навколишнього середовища при здійсненні екологічного моніторингу із застосуванням аерокосмічних технологій. Це підтверджується роботами науковців В.П. Горбуліна, О.М. Трофимчука, Г.Я. Красовського, В.І. Лялько, О.А. Машкова, В.Б. Мокіна, Г.І. Рудька, В.М. Триснюка, К.В. Сметаніна, В.О. Шумейка та інших [1, 2, 3].

Для забезпечення якісного та оперативного екологічного моніторингу за допомогою дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА) пропонується застосування комбінованого підходу, що складається з декількох етапів. На першому етапі визначається область спостереження та її характерні особливості. На другому етапі обирається бортове обладнання ДПЛА, яке дозволяє детально ідентифікувати та визначити розміри зон ураження з урахуванням вертикального профілю атмосферного шару. Третій етап передбачає передачу зібраної інформації з ДПЛА до наземних центрів обробки даних. Проте, варто зазначити, що такий підхід має певні обмеження, пов'язані з технічними можливостями бортового обладнання, що може впливати на точність екологічного моніторингу.

Структурно система моніторингу навколишнього середовища та екологічно небезпечних техногенних об'єктів повинна виконувати низку функцій. Серед них: збір даних про об'єкт моніторингу; обробка, узагальнення, класифікація та збереження інформації; моделювання фізико-хімічних процесів у різних типах геоекосистем; оцінка поточного стану геоекосистем; прогнозування їхнього майбутнього стану; забезпечення зворотного зв'язку; оцінка інформаційних прогалів та оптимізація інформаційних потоків.

Використання аерокосмічних технологій, зокрема безпілотних літальних апаратів, у поєднанні з наземними дослідженнями та геоінформаційними системами, дозволяє підвищити ефективність екологічного моніторингу. Це забезпечує своєчасне виявлення та реагування на екологічні загрози, сприяє збереженню та відновленню природних екосистем, а також підтримує сталий розвиток та екологічну безпеку регіонів.

Особливістю системи керування дистанційно пілотованими літальними апаратами (ДПЛА) є необхідність оперативного коригування алгоритмів управління у відповідь на зміну польотних завдань екологічного моніторингу сміттєзвалищ. Це вимагає розробки алгоритмів, здатних адаптуватися в реальному часі під час польоту ДПЛА [4]. Однак, сучасні підходи до оптимального керування часто включають обчислювальні процедури, які складно реалізувати на борту ДПЛА в режимі реального часу через обмежені обчислювальні ресурси. Тому розробка та впровадження ефективних систем оптимального керування для ДПЛА є актуальною проблемою.

**Метою даного дослідження** є підвищення рівня екологічної безпеки територій, що зазнають впливу сміттєзвалищ, шляхом вдосконалення технологічних процесів та модернізації бортового обладнання дистанційно пілотованих літальних апаратів.

**Об'єктом дослідження** виступає процес використання ДПЛА в системах екологічного моніторингу сміттєзвалищ.

Використання ДПЛА для екологічного моніторингу дозволяє оперативно отримувати дані про стан навколишнього середовища, що є критично важливим для своєчасного виявлення та реагування на екологічні загрози. Проте, ефективність таких операцій залежить від здатності систем керування ДПЛА швидко адаптуватися до змінних умов та завдань. Це вимагає впровадження адаптивних алгоритмів керування, які можуть працювати в реальному часі з урахуванням обмежених обчислювальних можливостей бортових систем.

Сучасні дослідження в цій галузі зосереджені на розробці методів оптимізації алгоритмів керування, які забезпечують координацію дій ДПЛА в реальному часі. Зокрема, розглядається застосування генеративних алгоритмів для підвищення точності роботи датчиків та використання згорткових нейронних мереж для розпізнавання об'єктів і навігації [5]. Також акцентується увага на важливості оптимізації алгоритмів управління роєм ДПЛА, що забезпечує координацію дій у реальному часі.

Удосконалення систем керування та бортового обладнання ДПЛА є ключовим фактором для забезпечення ефективного екологічного моніторингу. Це дозволить не лише підвищити точність та оперативність збору даних, але й сприятиме загальному підвищенню рівня екологічної безпеки.

## **Виклад основного матеріалу дослідження**

Запропонована методика екологічного моніторингу з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА) включає нові структурні елементи, що дозволяють визначити склад бортового обладнання, кількість необхідних ДПЛА та оптимальні маршрути їх руху відповідно до поставлених екологічних завдань.

### *Визначення складу бортового комплексу ДПЛА*

Ефективне застосування ДПЛА в екологічному моніторингу сміттєзвалищ вимагає ретельного вибору бортового обладнання, яке забезпечить максимальну ефективність у заданих умовах експлуатації. При цьому необхідно враховувати не лише технічні характеристики обладнання, але й специфіку екологічних завдань та особливості маршруту польоту [6, 7].

Вибір бортового обладнання повинен базуватися на аналізі параметрів, що підлягають моніторингу, та умов експлуатації. Наприклад, для виявлення забруднення водних об'єктів доцільно використовувати спектрометри, здатні визначати хімічний склад води, тоді як для моніторингу лісових масивів можуть бути корисними тепловізори для виявлення осередків пожеж. Крім того, врахування особливостей маршруту польоту, таких як рельєф місцевості та наявність перешкод, дозволяє оптимізувати вибір обладнання та забезпечити його безперебійну роботу протягом усього польоту.



*Визначення кількості ДПЛА та оптимальних маршрутів*

Кількість необхідних ДПЛА та їх маршрути повинні визначатися на основі масштабів та специфіки моніторингової зони. Використання математичних та імітаційних моделей дозволяє створити функціональні та інформаційні моделі, що допомагають встановити структурні зв'язки між елементами складних систем та оптимізувати процес моніторингу [8]. Це сприяє ефективному розподілу ресурсів та забезпечує повне охоплення території спостереження.

Оптимізація маршрутів руху ДПЛА є критичною для забезпечення ефективного збору даних та мінімізації витрат ресурсів. Використання генетичних та ройових алгоритмів дозволяє обчислювати оптимальні траєкторії руху з урахуванням динаміки літальних апаратів та особливостей місцевості. Інтеграція цих алгоритмів у системи керування ДПЛА забезпечує адаптивність та гнучкість у плануванні польотів, що особливо важливо в умовах змінних екологічних параметрів [9, 10].

Таким чином, впровадження запропонованої методики дозволяє підвищити ефективність екологічного моніторингу за рахунок оптимального вибору бортового обладнання, раціонального визначення кількості ДПЛА та розробки оптимальних маршрутів їх руху, що в сукупності сприяє своєчасному виявленню та реагуванню на екологічні загрози (рис. 1).



Рис. 1. Структурна схема проведення екологічного моніторингу з використанням ДПЛА

Таким чином, для визначення ефективного варіанта щодо рішення виконання завдання екологічного моніторингу слід скористатися виразом:

$$W = \sum_{i=1}^3 W_i(A_i)p_i = W_1(A_1)p_1 + W_2(A_2)p_2 + W_3(A_3)p_3, \quad (1)$$

де  $W_1(A_1)$  – показник ефективності застосування необхідного бортового обладнання в системі управління ДПЛА (залежно від необхідного);

$W_2(A_2)$  – показник ефективності застосування необхідного бортового обладнання для виконання завдання спостереження ДПЛА (залежно від кількості та якості завдання спостереження);

$W_3(A_3)$  – показник ефективності застосування алгоритму руху ДПЛА по заданому маршруту;

$p_i$  – ймовірність виконання поставленого завдання.

Одним з основних завдань є визначення координат об'єктів спостереження, що раптово з'являються. При цьому положення цих об'єктів може характеризуватися відповідними статистичними характеристиками невизначеності [11].

У такому випадку ймовірність виконання завдання бортовими системами ДПЛА можна визначити за виразом:

$$W_2 = \sum_{i=1}^m W_i P_{em}, \quad (2)$$

де  $W_i$  – ймовірність виконання завдання моніторингу бортовими системами ДПЛА по здобуттю і обробці відповідної інформації.

Час проведення екологічного моніторингу ДПЛА і передачі даних можна визначити за виразом

$$T = T_c + T_{об} + T_{np}, \quad (3)$$

де  $T_c$  – час зйомки бортовими системами ДПЛА;

$T_{об}$  – час первинної обробки інформації на борту;

$T_{np}$  – час передачі даних з ДПЛА на НПУ.

При цьому, ймовірність виконання проведення ЕМ із застосуванням ДПЛА буде залежати від ймовірності виявлення (визначення) антропогенного впливу під час зйомки

$$P_{em} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \frac{1}{\langle t_{ос} \rangle} e^{-\frac{t}{\langle t_{ос} \rangle}} \left[ \Phi \left( \frac{t - m_T}{\sqrt{2D_T}} \right) + \Phi \left( \frac{m_T}{\sqrt{2D_T}} \right) \right] dt, \quad (4)$$

де  $\Phi(\dots)$  – функція Крампа (інтеграл ймовірності);

$m_T$  – математичні очікування зйомки;

$D_T$  – дисперсії випадкових величин зйомки;

$t_{ос}$  – середній час поширення отруйної речовини в середовищі.

Функціонування бортових систем дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА) характеризується значною випадковістю, обумовленою неповною визначеністю умов експлуатації та наявністю різноманітних випадкових відхилень і помилок під час збору інформації, формування

керуючих дій та їх реалізації [12]. Це призводить до того, що результати роботи бортових систем ДПЛА мають стохастичний характер і описуються законами розподілу відповідних параметрів.

На початкових етапах досліджень важливо оцінити здатність ДПЛА виконувати поставлені екологічні завдання в умовах екологічного моніторингу. Для цього необхідно врахувати функціональні умови, такі як час виконання завдання, ймовірність успішного виконання, кількість необхідних апаратів та вартість операції. Ці параметри взаємопов'язані та впливають на загальну ефективність моніторингу.

Зокрема, час виконання завдання ( $\tau$ ) залежить від кількості залучених ДПЛА та їх технічних характеристик. Ймовірність успішного виконання завдання ( $P$ ) визначається надійністю бортових систем та умовами навколишнього середовища. Кількість необхідних ДПЛА ( $N$ ) обумовлюється площею моніторингової зони та специфікою завдання. Вартість операції ( $C$ ) включає витрати на підготовку, експлуатацію та обслуговування апаратів.

$$f = \{\tau, P, N, C\}, \quad (5)$$

де  $\tau$  – час виконання ДПЛА поставленого завдання для виконання екологічного моніторингу ( $\tau = \frac{T}{N} \rightarrow \min$  при  $T = T(N_1, N_2, \dots, N_n) \rightarrow \min$ );

$P$  – ймовірність виконання поставленого завдання ДПЛА в ході проведення ЕМ ( $P = \prod_{i=1}^n P(N_i) \rightarrow \max$ );

$N$  – кількість ДПЛА, необхідних для виконання поставленого завдання ЕМ ( $N = \sum_{i=1}^n N_i \rightarrow \min$ );

$C$  – вартість, яка необхідна для застосування ДПЛА при виконанні поставленого завдання ЕМ ( $C = \sum_{i=1}^n C(N_i) \rightarrow \min$ ).

Розуміння та аналіз цих параметрів дозволяє оптимізувати процес екологічного моніторингу за допомогою ДПЛА, забезпечуючи баланс між ефективністю, надійністю та економічною доцільністю проведених операцій.

## Висновки

Розроблено аналітичну модель оцінювання ефективності виконання екологічних завдань моніторингу за допомогою ДПЛА, яка передбачає оптимізацію параметрів бортового обладнання відповідно до специфіки визначення антропогенного впливу на довкілля.

Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні вдосконаленого науково-методичного підходу до використання ДПЛА в екологічному моніторингу. Це дозволяє запровадити нові методи комплексного спостереження за станом навколишнього середовища на основі авіаційних сенсорних систем, а також удосконалити процеси оцінювання та контролю екологічних параметрів у межах заданої території.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare UTPRESS ISSN 1582-0548*, 1, 61–67.
2. Grekov, L.D., Krasovsky, G.Y., Trofimchuk, O.M. (2007). Space monitoring of land pollution by man-made dust. *Kiev. Scientific thought*.
3. Триснюк В.М. Моніторинг використання та екологічного стану земель за допомогою безпілотних літальних апаратів / Триснюк В.М., Шумейко В.О., Кащишин О.В., Курило А.В., Сметанін К.В. // *Сучасні інформаційні системи*. – Х.: Т.2. № 4, – 2018. – С. 124-127.
4. Шевчук О.В., Азімов О.Т. Моніторинг Здолбунівського сміттєзвалища ТПВ (Рівненська область, Україна) із застосуванням безпілотного літального апарату / Колективна монограф. за матеріалами 20-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року» (м. Київ, 04-08 жовт. 2021 р.); За заг. ред. С.О. Довгого. Київ: ТОВ «Вид-во «Юстон», 2021. С. 121–126.
5. Триснюк В.М. Особливості побудови мобільної системи екологічного моніторингу оперативного визначення стану довкілля / В.М. Триснюк, К.В. Сметанін // *Матеріали науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління»*, (м. Полтава–Баку–Харків–Жиліна, 26-27 квітня 2018 р.). – Харків: ФОП Петров В.В., 2018. – С. 93.
6. Myrontsov, M.L. [2019] The problem of equivalence in inverse electrometry problems of oil and gas wells. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.
7. 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.
8. Trofymchuk, O., Kreta, D., Myrontsov, M., Okhariev, V., Shumeiko, V., Zagorodnia, S. [2015] Information Technology in Environmental Monitoring for Territorial System Ecological Assessment. *Journal of Environmental Science and Engineering*. A4, 79-84.
9. 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.
10. Trofymchuk O., & Kaliukh I. (2013). Activation of landslides in the south of Ukraine under the action of natural seismic impacts (experimental and analytical studies). *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2(2), 68-76.
11. Триснюк В.М. Розробка системи оперативного моніторингу територій з використанням ДПЛА / В.М. Триснюк, К.В. Сметанін // *Матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Наука III тисячоліття: пошуки, проблеми, перспективи розвитку»*, (м. Бердянськ, 25-26 квітня 2018 р.). – м. Бердянськ: БДПУ, 2018. – С. 187-189.
12. Триснюк В.М. Створення системи мобільного екологічного моніторингу / В.М. Триснюк, В.О. Охарев, Т.В. Триснюк, К.В. Сметанін, А.В. Курило // *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. Івано-Франківськ: Симфонія форте. – 2018, №2 (18) – С. 120-128.

*Стаття надійшла до редакції 16.01.2025 і прийнята до друку після рецензування 07.03.2025*

## REFERENCES

1. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare UTPRESS ISSN 1582-0548*, 1, 61–67.
2. Grekov, L.D., Krasovsky, G.Y., & Trofimchuk, O.M. (2007). Space monitoring of land pollution by man-made dust. *Kiev. Scientific thought*.
3. Trysnyuk, V.M., Shumeiko, V.O., Kashchyshyn, O.V., Kurylo, A.V., & Smetanin, K.V. (2018). Monitoring the use and ecological condition of land using unmanned aerial vehicles. *Modern information systems*, 2 (4), 124-127 [in Ukrainian].
4. Shevchuk, O. V., & Azimov, O. T. (2021). Monitoring of the Zdolbunivka MSW landfill (Rivne region, Ukraine) using an unmanned aerial vehicle. In S. O. Dovhy (Ed.), *Collective monograph based on the materials of the 20th International Scientific and Practical Conference "Modern information technologies for managing environmental safety, environmental management, and emergency measures: challenges of 2021" (Kyiv, October 4-8, 2021)* (pp. 121–126). essay, LLC "Publishing House "Yuston" [in Ukrainian].
5. Trysnyuk, V.M., & Smetanin, K.V. (2018). Features of building a mobile environmental monitoring system for rapid determination of the state of the environment. In *Proceedings of the scientific and technical conference "Modern directions of development of information and communication technologies and management tools"*, (Poltava-Baku-Kharkiv-Zhilina, April 26-27, 2018) (p. 93). Kharkiv: FOP Petrov V.V. [in Ukrainian].
6. Myrontsov, M.L. (2019). The problem of equivalence in inverse electrometry problems of oil and gas wells. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts*.
7. 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.
8. Trofymchuk, O., Kreta, D., Myrontsov, M., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Zagorodnia, S. (2015). Information Technology in Environmental Monitoring for Territorial System Ecological Assessment. *Journal of Environmental Science and Engineering*, A4, 79-84.
9. 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*.
10. Trofymchuk O., & Kaliukh I. (2013). Activation of landslides in the south of Ukraine under the action of natural seismic impacts (experimental and analytical studies). *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2(2), 68-76.
11. Trysnyuk, V.M., & Smetanin, K.V. (2018). Development of a system of operational monitoring of territories using drones. In *Materials of the II International Scientific and Practical Internet Conference "Science of the III Millennium: Searches, Problems, Development Prospects"*, (Berdyansk, April 25-26, 2018) (pp. 187-189). Berdyansk: BDPU [in Ukrainian].
12. Trysnyuk V.M., Oharev, V.O., Trysnyuk, T.V., Smetanin, K.V., & Kurylo, A.V. (2018). Creation of a mobile environmental monitoring system. *Environmental safety and balanced resource use*, 2 (18), 120-128 [in Ukrainian].

*The article was received 16.01.2025 and was accepted after revision 07.03.2025*

### **Шевчук Олександр Вікторович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору  
Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3287-8216> **e-mail:** [oleksandrshvchuk17@gmail.com](mailto:oleksandrshvchuk17@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 28.03.25 Формат 70x108/16. Папір офсетний.  
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 15.58

Обл.-вид. арк. 12.28

Тираж 300 примірників

Замовлення № \_\_\_\_

---

КИЇВ 2025