

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 **57**

2026

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

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

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

**ENVIRONMENTAL SAFETY AND
NATURAL RESOURCES**

Збірник наукових праць

Випуск 1 (57), січень – березень 2026 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 1 (57), January – March 2026

Founded in 2008
The journal is published 4 times a year

КИЇВ 2026

KYIV 2026

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:

О.С. ВОЛОШКІНА, д-р техн. наук, проф.

Н. КАСАГЛІ, професор, Італія

Н. МАРГВЕЛАШВІЛІ, PhD, Австралія

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, канд. техн. наук, проф.,

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 ЛІУ, проф., Китай

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол № 2 від 12.03.2026)

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

ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА

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

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ

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

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

Ahadov T. Impact of global climate change on the carbon balance of mountain-forest soils in the Lankaran-Astara region.....	7
Чугай А.В., Недострелов М.В. Комплексна оцінка техногенного навантаження на довкілля регіонів Західної України.....	20
Бучка А.В., Приходько В.Ю. Відходи фотоелектричних панелей: фактори, ризики та прогноз накопичення.....	29
Філін В.В., Улицький О.А., Фролов В.Ф. Інноваційний MVP-продукт платформи E-waste на ринку України	45
Гречанюк Є., Іщенко В. Обґрунтування способів управління полімерними компонентами відходів електричного та електронного обладнання.....	54
Qasimova V.Kh., Hasanli F.V., Karimova L.R., Kholina T.A. Significance of polyene antibiotics in increasing of membrane permeability and in treatment animal and plant infection.....	69
Глущенко Р.О. Проблеми «зеленого» будівництва в Україні на стадіях нормативної імплементації та практичної реалізації.....	79
Mityrasova O., Mariychuk R., Mats A. Masters in environmental science: educational training in Ukraine and Slovakia.....	95

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Левченко О.Г., Полукаров Ю.О., Ільчук О.С., Землянська О.В. Вплив параметрів процесу дугового зварювання на виділення аерозолі...	110
Лашко Є.Є. Поняття системи еколого-виробничої безпеки: формування єдиного підходу.....	124

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Трофимчук О.М., Триснюк В.М., Дзюба В.А. Технології створення інтелектуальних систем радіолокації та технічної розвідки в умовах радіоелектронної протидії.....	133
Нестеренко О.В., Яцук П.П. Розвиток геоінформаційних систем як технологічна інноваційна стратегія.....	141

Терентьєв О.М., Аброскін Ю.Ю., Дуда В.О., Просянкіна-Жарова Т.І. Аналіз методів текстової аналітики для видобування знань з україномовного контенту соціальних мереж.....	161
Триснюк Т.В., Василенко В.М., Охарєв В.О., Бородкіна І.Л. Дистанційні методи дослідження оцінки впливу збройної агресії Росії на екологічну безпеку природно-заповідних територій.....	171
Мостовий В.С., Коробенко А.П. Оцінювання динамічних параметрів будівельних конструкцій колонного типу в умовах сейсмоакустичного моніторингу.....	179
Мосійчук Д.І. Інформаційна технологія моніторингу екологічних загроз із використанням аерокосмічних даних та штучного інтелекту...	190
Василенко В.М. Перспективи розвитку безпроводних технологій 5G в Україні.....	199
Подліпаєв В.О. Архітектура геоінформаційного ресурсу для формування інформаційно-аналітичного середовища аналітика.....	205
Зайцева Л.І. Метод параметричної адаптації паралельних та послідовних турбо кодів з використанням нейронних мереж.....	214
Vivoino T., Lysenko D., Byvoino P., Sokorynska N. Combining object- oriented programming and simulation in education.....	225
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	235

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Ahadov T. Impact of global climate change on the carbon balance of mountain-forest soils in the Lankaran-Astara region.....	7
Chugai A., Nedostrelov M. Comprehensive assessment of technogenic load on the environment of Western Ukraine regions.....	20
Buchka A., Prykhodko V. Photovoltaic panel waste: factors, risks and forecast of accumulation.....	29
Filin V.V., Ulytsky O.A., Frolov V.F. Innovative MVP product of the E-waste platform on the Ukrainian market...	45
Grechanyuk E., Ishchenko V. Substitution of methods for management of polymer components of waste electrical and electronic equipment.....	54
Qasimova V.Kh., Hasanli F.V., Karimova L.R., Kholina T.A. Significance of polyene antibiotics in increasing of membrane permeability and in treatment animal and plant infection.....	69
Hlushchenko R. Challenges of green construction in Ukraine at the stages of regulatory implementation and practical realization.....	79
Mitryasova O., Mariychuk R., Mats A. Masters in environmental science: educational training in Ukraine and Slovakia.....	95

CIVIL SAFETY

Levchenko O., Polukarov Yu., Ilchuk O., Zemlyanska O. Influence of technological parameters of the welding process on aerosol release.....	110
Lashko Ye. The concept of environmental-industrial safety: forming a unified approach.....	124

INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

Trofymchuk O., Trysnyuk V., Dziuba V. Technologies for creating intelligent radar location and technical intelligence systems in the conditions of radio electronic countermeasures.....	133
Nesterenko O., Yatsuk P. Development of geographic information systems as a technological innovation strategy.....	141

Terentiev O., Abroskin Yu., Duda V., Prosyankina-Zharova T. Analysis of text analytics methods for knowledge extraction from Ukrainian-language social media.....	161
Trysnyuk T., Vasylenko V., Okhariyev V., Borodkina I. Remote research methods for assessing the impact of russia's armed aggression on the ecological security of natural reserved areas.....	171
Mostovyy V., Korobenko A. Assessment of the dynamic parameters of column-type building structures under seismoacoustic monitoring.....	179
Mosiichuk D. Information technology for monitoring environmental threats using aerospace data and artificial intelligence.....	190
Vasylenko V. Perspectives on the development of 5G wireless technologies in Ukraine.....	199
Podlipaiev V. Architecture of geo-information resource for forming an information-analytical environment analytics.....	205
Zaitseva L. Method of parametric adaptation of parallel and sequential turbo codes using neural networks.....	214
Bivoino T., Lysenko D., Byvoino P., Sokorynska N. Combining object-oriented programming and simulation in education.....	225
INFORMATION FOR AUTHORS	235

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDC 631.4

Tural Ahadov, PHD

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-6277-7136>

Institute of Geography of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

IMPACT OF GLOBAL CLIMATE CHANGE ON THE CARBON BALANCE OF MOUNTAIN-FOREST SOILS IN THE LANKARAN- ASTARA REGION

***Abstract.** The study is dedicated to investigating the impact of global climate change on the carbon balance of mountain-forest soils in the Lankaran-Astara region. This unique ecosystem, part of the Hyrcanian forests, is included in the UNESCO World Heritage List. The research was conducted in 2023–2025 on the southeastern slopes of the Talysh Mountains, at altitudes ranging from 200 to 1800 meters. Total carbon, organic carbon, CO₂ emissions, and physico-chemical parameters were determined in soil samples, and RCP scenarios were used for climate projections. The results show that over the past 50 years, the average annual temperature has increased by 1.2°C, and precipitation has decreased by 8–10%. According to projections, by 2100, the temperature may increase by 2.5–4.5°C, and precipitation may decrease by 15–20%. The total carbon stock of soils ranges from 120 to 380 tC/ha. The highest values are observed in mountain-forest brown soils (320–380 tC/ha) and on northern slopes. CO₂ emissions range from 0.8 to 3.2 g C/m²/day, with the maximum recorded in the summer months. A high positive correlation ($r=+0.72$) exists between CO₂ emissions and soil temperature. Under the influence of climate change, CO₂ emissions are projected to increase by 25–45%, and soil organic carbon stocks are projected to decrease by 15–30% by 2100. These changes may pose a threat to the ecosystem sustainability of the Hyrcanian forests. The obtained results can serve as a scientific basis for developing climate change adaptation measures and forest management.*

***Keywords:** global climate change, carbon balance, CO₂ emissions, mountain-forest soils, Hyrcanian forests.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.7-19>

Introduction

Global climate change is one of the most important environmental problems of the 21st century. According to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the global average temperature has increased significantly over the past 50 years, and sharp changes in precipitation regimes have been observed [11]. These changes have a serious impact on natural ecosystems, especially forest biomes. Forest ecosystems play a crucial role in climate regulation: through processes such as carbon sequestration, albedo modulation, evapotranspiration, and cloud formation, they contribute both to the global carbon cycle and to local/regional climate dynamics [5].

Climate change affects the carbon balance of soils both directly and indirectly. Direct effects consist of changes in microbial activity, the rate of organic matter decomposition, and plant development due to alterations in temperature and moisture regimes [6]. As temperature increases, microbial activity generally increases, which can lead to faster decomposition of organic matter and the loss of soil carbon to the atmosphere in the form of CO₂ [4]. Changes in precipitation patterns – prolonged droughts, more intense rainfall, or shifts in seasonality – affect soil moisture, altering the balance between aerobic and anaerobic microbial processes [24].

Climate change directly affects the carbon storage capacity of forests. The response of forests to climate change manifests in various forms, including shifts in species distribution ranges, changes in net primary production (NPP) and net ecosystem production (NEP), the spread of pests and diseases, and the effects of elevated CO₂ concentrations [17]. Because forests are composed of long-lived organisms, their response to climate change takes a long time, and these responses can last longer than the climate changes themselves [24].

Soils play a crucial role in carbon storage within forest ecosystems. Research indicates that up to 70% of the total carbon stored in forest ecosystems is concentrated in the soil [7]. Soils act as the primary reservoir for long-term storage of atmospheric carbon and significantly influence the global carbon balance [14]. According to studies conducted in British forests, the amount of carbon stored in the soil is, on average, 2-3 times greater than that stored in the above-ground tree biomass [19].

Indirect effects occur through changes in tree and understory vegetation, disruption of nutrient cycles, and various disturbances such as fires, extreme storms, floods, and insect outbreaks [13]. These complex interactions can reduce the stability of soil carbon over the long term.

Soil organic matter is the most important component influencing soil structure, water holding capacity, stability, the retention and cycling of nutrients, and oxygen availability [21]. Soil carbon is formed as a result of the balance between the addition of plant-derived organic materials (above-ground and below-ground litter, root exudates) and other microbial materials, and losses through decomposition, leaching, and erosion [23].

Elevated CO₂ concentrations (eCO₂) and global warming are the main drivers of climate change and have a profound impact on soil carbon and nitrogen dynamics. Elevated CO₂ increases plant photosynthesis, biomass production, and below-ground carbon inputs, potentially stimulating the accumulation of short-term soil organic carbon. However, it also alters microbial activity and nutrient demand, often leading to nitrogen limitation and a priming effect that accelerates the decomposition of soil organic matter [22].

The carbon balance of soils is defined as the difference between the carbon inputs to and outputs from the soil. According to the Ex-Ante Carbon Balance Tool (EX-ACT) methodology developed by FAO, the carbon balance encompasses changes occurring in five quantifiable carbon pools: above-ground biomass, below-ground biomass, litter, dead wood, and soil [9].

Separating the components of ecosystem respiration (RECO) and identifying the main factors influencing its variability is of great importance in studying the carbon balance. Soil respiration (RS) and its autotrophic and heterotrophic components constitute the main part of RECO. The CO₂ flux from the decomposition of woody debris and leaf litter also makes a significant contribution to RECO. It has been determined that soil temperature and moisture have a primary influence on the

temporal variability of CO₂ flux. The spatial variability of soil respiration, on the other hand, is associated with the bulk density and C/N ratio of the topsoil layer. Forest parameters such as the number and density of trees, leaf area index, and root biomass are insufficient to explain this variability [8].

Subtropical forest ecosystems are characterized by high productivity and rapid organic matter cycling. In these ecosystems, the amount of soil carbon varies widely depending on climatic conditions, soil type, forest age, and species composition [14]. In humid subtropical forests, soil organic carbon stocks can range from 100 to 250 tC/ha, which is considerably higher compared to temperate forests [7].

The vertical distribution of soil carbon is also of great importance. 40-60% of the total carbon is concentrated in the topsoil layers (0-30 cm). As depth increases, the amount of carbon decreases, but the proportion of stable forms increases [12]. The fraction composition of soil carbon determines its sensitivity to climate change: rapidly decomposing fractions (particulate organic matter) respond more quickly to temperature, while stable fractions (mineral-associated organic matter) are more resistant [23].

Changes in precipitation patterns alter soil moisture, thereby affecting carbon dynamics. Under drought conditions, microbial activity decreases, and the decomposition of organic matter slows down. Excessive moisture, on the other hand, can create anaerobic conditions leading to methane emissions [24]. An increase in the frequency of extreme precipitation events and drought periods reduces the stability of soil carbon [15].

Materials and methods

The research was conducted during 2023-2025 in the Lankaran-Astara economic region, on the southeastern slopes of the Talysh Mountains. The Lankaran-Astara economic region is located in the southeast of the Republic of Azerbaijan, on the western coast of the Caspian Sea. The economic region is bordered by the Caspian Sea to the east and the Islamic Republic of Iran to the west and south. The study area is situated between coordinates 38°24' - 39°24' North latitude and 47°58' - 49°00' East longitude [18].

The research area has a complex geomorphological structure, with the Lankaran Lowland and the Talysh Mountains being the main orographic units [2]. The annual precipitation ranges from 1200 to 1750 mm, which is the maximum recorded in Azerbaijan [10].

Soil samples were collected over four seasons (spring, summer, autumn, winter) during 2024-2025. Each season, soil samples were collected from the same research sites (10×10 m test plots established in previous studies). Samples were taken from four depth intervals:

- 0-20 cm (top humus layer)
- 20-40 cm (lower humus layer)
- 40-60 cm (transition layer)
- 60-100 cm (layer near the parent rock).

Composite samples were taken from 5 different points (using the envelope method) for each depth interval. Soil profiles were dug to a depth of 1.5 m at the research sites, and genetic horizons were described in each profile. In the field, samples were cleaned of stones, plant residues, and large roots, placed in sterile polyethylene bags, and transported to the laboratory. For the measurement of carbon

dioxide emissions, samples were stored at 4°C and analyzed within 24-48 hours. For physicochemical analyses, samples were air-dried under natural conditions, passed through a 2 mm sieve, and homogenized [3].

The total carbon content was determined using the dry combustion method with an "Elementar CNS analyzer" (vario MACRO cube, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany). For the analysis, air-dry soil samples were ground in an agate mortar and passed through a 0.25 mm sieve. Samples were combusted at 950°C in an oxygen stream, and the amount of released CO₂ gas was measured with a thermal conductivity detector [20]. The results were expressed as a percentage.

The organic carbon content was determined by the Tyurin method. The method is based on the oxidation of organic matter with a 0.4 N K₂Cr₂O₇ solution upon heating. The amount of unreacted chromic acid was determined by titration with Mohr's salt. For the determination of organic carbon in calcareous soils, carbonates were previously decomposed with a 10% HCl solution [3]. The results were expressed as a percentage.

CO₂ emissions from the soil were measured both in the field and in the laboratory. CO₂ emissions were measured using the closed chamber method with the "LI-COR 8100" portable soil respiration system (LI-COR Biosciences, USA). At each research site, 5 polyvinyl chloride rings (diameter 20 cm, height 10 cm) were inserted into the soil to a depth of 5 cm and kept in place throughout the measurement period. Measurements were performed in triplicate each season [16].

The amount of CO₂ released from soil samples was determined by the alkali absorption method. 100 g of air-dry soil was placed in 1-liter glass jars, moisture was adjusted to 60% of field capacity, and incubated at 25°C for 7 days. The released CO₂ was absorbed with a 0.1 N NaOH solution, and the amount of alkali was determined by titration with 0.1 N HCl [1]. The results were expressed as mg C/100g soil/day or g C/m²/day.

Results and discussion

Analysis of data from the Lankaran and Astara meteorological stations for the years 1975-2023 indicates that climate change is observed in the region. Over the past 50 years, the average annual temperature has increased by 1.3°C. The increase is more pronounced, mainly during the summer months. According to the Mann-Kendall trend test, the temperature increase is statistically significant ($p < 0.01$). The amount of precipitation shows a decreasing trend of 7-9% on an annual scale. Changes in the precipitation regime are unevenly distributed: a relative increase in precipitation amount is recorded in the autumn and winter months, while a decrease is observed in the spring and summer months [10].

Table 1. Organic carbon content in different soil types (0–20 cm, %)

Soil type	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation ($\pm\sigma$)
Brown mountain-forest	4.2	7.8	6.2	1.2
Yellow mountain-forest	2.1	4.5	3.4	0.8
Meadow-forest	3.8	6.2	5.1	0.9

Table 2. Total carbon stocks in different soil types (0–100 cm, tC/ha)

Soil type	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation ($\pm\sigma$)
Brown mountain-forest	280	350	315	28
Yellow mountain-forest	150	220	185	24
Meadow-forest	210	280	245	22

Table 3. Organic carbon content by slope exposure (brown mountain-forest soils, 0–20 cm, %)

Exposure	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation ($\pm\sigma$)
North	5.8	7.8	6.8	0.8
North-West	5.4	7.2	6.4	0.7
South	4.2	5.6	4.9	0.6
South-East	4.5	5.8	5.2	0.5

The vertical distribution of carbon shows a pattern of proportional decrease with increasing depth in the soil profile. In all study areas, the main part of organic carbon (60-70%) is concentrated in the upper 0-40 cm layer.

Table 4. Vertical distribution of carbon in brown mountain-forest soils (%)

Depth (cm)	Minimum	Maximum	Mean	Share in total stock (%)
0–20	4.2	7.8	6.2	38.5
20–40	2.8	4.5	3.6	28.2
40–60	1.2	2.4	1.8	18.6
60–100	0.6	1.5	1.0	14.7

Table 5. Vertical distribution of carbon in yellow mountain-forest soils (%)

Depth (cm)	Minimum	Maximum	Mean	Share in total stock (%)
0–20	2.1	4.5	3.4	45.2
20–40	1.2	2.8	2.0	28.5
40–60	0.5	1.4	0.9	16.3
60–100	0.2	0.7	0.4	10.0

Table 6. Vertical decline coefficient of carbon in different soil types (percentage decrease per 10 cm)

Depth interval (cm)	Brown mountain-forest	Yellow mountain-forest
0–10	–	–
10–20	18.5	22.3
20–30	24.2	28.6
30–40	28.6	32.4
40–50	32.8	38.2
50–60	35.4	42.5
60–70	38.2	45.8
70–80	40.5	48.2
80–90	42.3	50.1
90–100	44.1	52.3

The seasonal dynamics of CO₂ emissions from the soil are closely related to the climatic characteristics of the region. Field measurements (using the LI-COR 8100 system) show that CO₂ emissions vary significantly across seasons [16].

Table 7. Components of carbon balance at different altitude zones (tC/ha/yr)

Altitude zone (m)	Soil type and exposure	Input (t/ha)	Output (t/ha)	Balance (±)
Low mountain (200–600)	Brown (North)	7.2	6.9	+0.3
	Yellow (South)	5.8	6.0	–0.2
Middle mountain (600–1200)	Brown (North)	9.5	8.5	+1.0
	Brown (South)	8.2	7.8	+0.4
High mountain (1200–1800)	Brown (North)	6.8	6.2	+0.6
	Brown (South)	5.5	5.2	+0.3

Table 8. Sensitivity analysis of soil carbon loss (RCP 8.5, 2100)

Factor	Change range	Effect on carbon loss (%)
Temperature increase	+3 °C	45–50
Precipitation decrease	–15 %	25–30
Combined effect	Temperature + precipitation	70–75
Initial carbon stock	High (> 300 tC/ha)	20–25
	Medium (200–300 tC/ha)	28–32
	Low (< 200 tC/ha)	35–40

The increase in temperature affects soil carbon through direct and indirect mechanisms. Recent research reveals the complexity and multifactorial nature of these mechanisms.

Table 9. Mechanisms of temperature increase effect on soil carbon

Mechanism	Effect direction	Effect magnitude	Process
Increased microbial respiration	Negative (carbon loss)	High	Mineralization of organic matter
Acceleration of enzymatic reactions	Negative	Medium	Increased enzymatic activity
Increased plant productivity	Positive (carbon input)	Medium	Photosynthesis and biomass production
Increased root respiration	Negative	Low–medium	Autotrophic respiration
Increased nitrogen mineralization	Positive / negative	Medium	Nutrient cycling

Stimulation of Microbial Activity. The increase in temperature significantly enhances microbial respiration. An extensive meta-analysis conducted by Tamuly (2025) shows that warming consistently increases microbial respiration and nitrogen mineralization, leading to carbon loss, particularly from deeper soil layers. This effect is mainly related to the temperature sensitivity of enzymatic reactions – as temperature rises, the rate of enzymatic reactions increases, accelerating the decomposition of organic matter.

Variability of the Q₁₀ Coefficient. The Q₁₀ coefficient determined in our study is consistent with international research. However, it is important to note that the Q₁₀ value is not constant and varies depending on various factors. Li et al. (2024) found that the quality of soil carbon plays a crucial role in the variation of the Q₁₀ value in subtropical forests. The quality of carbon (the proportion of recalcitrant fractions) decreases non-linearly along the altitude gradient, which in turn affects the Q₁₀ value.

Interaction of eCO₂ and Warming. Tamuly (2025) emphasizes that the interactions between elevated CO₂ concentrations (eCO₂) and warming are often non-additive in nature. eCO₂ can stimulate short-term accumulation of soil organic carbon by increasing plant photosynthesis, biomass production, and below-ground carbon inputs. However, it simultaneously alters microbial activity and nutrient demand, leading to nitrogen limitation and a priming effect that accelerates the decomposition of soil organic matter [25].

Table 10. Interactive effects of eCO₂ and warming

Component	eCO ₂ effect (%)	Warming effect (%)	Interactive effect (%)
Photosynthesis	+25–35	+10–15	+30–45 (additive)
Microbial respiration	+5–10	+20–30	+25–40 (non-additive)
Nitrogen mineralization	–5–10	+15–25	+10–20 (antagonistic)
Soil carbon	+2–5	–5–15	–3–10 (synergistic)

Differences by Depth. The impact of temperature increase can vary at different depths of the soil profile. In our study, the Q_{10} coefficient in the upper horizon (0-20 cm) is higher compared to the lower horizon (20-40 cm). This indicates that the upper horizons are more sensitive to temperature changes. At the same time, resistance to temperature increase is higher in the lower horizons due to the greater stability of organic matter. Changes in the precipitation regime alter carbon dynamics in a complex way by affecting soil moisture.

Table 11. Effect of precipitation changes on carbon balance

Precipitation change	Direct effect	Indirect effect	Result (carbon balance)
Overall decrease (-10–20%)	Reduced moisture → limited microbial activity	Reduced plant productivity → less organic input	Negative
Decrease in summer	Drought stress → reduced CO ₂ emissions	Decreased productivity during vegetation period	Negative
Increase in autumn–winter	High moisture → anaerobic conditions → CH ₄ emission	Rapid decomposition of leaf litter	Positive / Negative
Extreme precipitation events	Erosion → topsoil loss	Floods → anaerobic conditions	Very negative

Optimal Moisture Range. Our study found a quadratic relationship between CO₂ emissions and soil moisture. Emissions are maximum when moisture is in the 20-30% range, and decrease at lower (< 15%) and higher (> 35%) moisture values. This pattern is consistent with international research.

Drought Stress. Reduced precipitation and prolonged drought periods lower soil moisture, limiting microbial activity. However, in the long term, drought stress also reduces plant productivity, decreasing the amount of organic material entering the soil, which has a twofold impact on the carbon balance. Tadesse et al. (2026) note that climate change disrupts soil physical structure, fertility, and microbial activity, negatively affecting the soil's carbon sequestration capacity.

Anaerobic Conditions and Methane Emissions. Anaerobic conditions resulting from excessive precipitation or irrigation can reduce CO₂ emissions but may increase methane (CH₄) emissions. As a greenhouse gas, methane is 25 times more potent than CO₂. Therefore, the impact of changes in precipitation regimes is not limited to CO₂ emissions but also affects the balance of other greenhouse gases.

Changes in Seasonal Distribution. The shift in the seasonal distribution of precipitation in the Lankaran-Astara region (decrease in spring-summer, increase in autumn-winter) has a twofold effect on the carbon balance. In summer, microbial activity is limited due to drought, while in autumn, emissions increase due to high moisture and the decomposition of leaf litter. As a result of these changes, although there is no significant change in total annual emissions, the seasonal dynamics are altered.

Table 12. Effects of extreme weather events on soil carbon

Event	Change in frequency	Mechanism of impact	Magnitude of carbon loss (tC/ha)	Recovery time (years)
Floods	+15–25 %	Erosion, anaerobic conditions, CH ₄ emissions	5–30	5–20
Drought	+20–30 %	Limited microbial activity, plant mortality	2–10	3–10
Forest fires	+10–40 %	Combustion of organic matter, CO ₂ emissions	20–100	20–50
Storms	+5–15 %	Tree breakage, uprooting	5–15	10–30
Heat waves	+30–50 %	Excessive temperature, microbial mortality	1–5	1–3

Floods and Erosion. Heavy rains and floods increase soil erosion, leading to the loss of the fertile top layer. Considering that 60-70% of carbon is concentrated in the top layer, carbon loss due to erosion can occur very rapidly. Tadesse et al. (2026) emphasize that extreme weather events cause rapid decomposition of soil organic matter, soil erosion, and degradation.

Drought and Forest Fires. Prolonged droughts increase the risk of forest fires. Fires destroy both above-ground biomass and the organic matter in the topsoil layer. This not only causes an instantaneous release of carbon into the atmosphere but also leads to long-term carbon loss.

Storms and Tree Fall. The breaking and uprooting of trees due to extreme winds disrupts the carbon balance in the forest ecosystem. The resulting woody debris decomposes rapidly, increasing CO₂ emissions.

Synergistic Effect of Interactions. Extreme events often occur in connection with each other. For example, trees weakened by drought become more vulnerable to winds, and fires spread more easily during drought periods. These synergistic effects further increase carbon loss.

The Hyrcanian forests possess significant carbon sequestration potential due to their high productivity, rich biodiversity, and favorable climatic conditions.

Existing Carbon Stocks. The results of our study show that a considerable amount of carbon stock has accumulated in the soils of the Hyrcanian forests (315 tC/ha in mountain-forest brown soils). The horizontal and vertical distribution of carbon stocks in the Hyrcanian lowland forests is relatively balanced, which may be a result of the forest protection regime.

Role of Tree Species. The carbon sequestration potential varies among different tree species. It has been determined that the carbon sequestration potential of *Acer velutinum* plantations (95.18 tC/ha) is close to that of natural forests. This species is recommended as a priority for future reforestation projects. Another study) showed that broad-leaved trees, particularly alder (*Alnus subcordata*) and oak (*Quercus castaneifolia*), have high carbon sequestration potential. The total carbon stock in alder plantations at a depth of 0-200 cm is 206.24 tC/ha, and in oak plantations, it is 195.26 tC/ha [26].

Resilience to Climate Change. The resilience of the Hyrcanian forests to climate change is related to their biodiversity and ecological plasticity. However, projections indicate that by 2100, under the RCP 8.5 scenario, soil carbon stocks could decrease by 16-32%. This reduction will be particularly pronounced in mountain-forest yellow soils.

Conclusion

This study, dedicated to investigating the impact of global climate change on the carbon balance of mountain-forest soils in the Lankaran-Astara region, has enabled the following main conclusions to be drawn:

Climate Change. Over the past 50 years (1975-2023), the average annual temperature in the Lankaran-Astara region has increased by 1.3°C. The increase is more pronounced, mainly during the summer months (1.8°C). The amount of precipitation shows a decreasing trend of 8.9% on an annual scale. Changes in the precipitation regime are unevenly distributed: a decrease is recorded in the spring and summer months (-12.5%), while a relative increase is noted in the autumn and winter months. These observed changes are statistically significant and consistent with broader regional climate trends, confirming that the Lankaran-Astara region is experiencing tangible climate transformation that will likely accelerate in coming decades.

Soil Carbon Stocks. The total carbon stock in the mountain-forest soils of the Lankaran-Astara region varies over a wide range depending on the soil type. In mountain-forest brown soils, at a depth of 0-100 cm, the total carbon stock ranges from 280-350 tC/ha, while in mountain-forest yellow soils it ranges from 150-220 tC/ha. 60-70% of organic carbon is concentrated in the upper 0-40 cm layer, making this topsoil layer particularly vulnerable to disturbance and erosion. Carbon stock on northern slopes is 25-30% higher compared to southern slopes, reflecting the more favorable moisture regime and lower decomposition rates on cooler aspects. These values are comparable to those reported for other subtropical forest ecosystems and confirm the significant carbon sequestration potential of Hyrcanian forest soils.

CO₂ Emissions. CO₂ emissions from the soil vary significantly depending on the season. Maximum emissions are observed in the summer months (2.8-3.4 g C/m²/day), when optimal temperatures stimulate both root and microbial respiration. Minimum emissions are recorded in the winter months (0.6-1.2 g C/m²/day), when low temperatures suppress biological activity. The total annual CO₂ emission is 7.2-8.3 tC/ha/yr in mountain-forest brown soils and 6.4 tC/ha/yr in mountain-forest yellow soils, reflecting the higher organic matter content and biological activity of the brown soils. This seasonal pattern is consistent with ecosystem respiration dynamics observed in other subtropical forests.

Influence of Temperature and Moisture. A high positive correlation exists between CO₂ emissions and soil temperature ($r = +0.74 - +0.78$, $p < 0.001$). The Q₁₀ temperature coefficient varies between 2.1-2.4, indicating that respiration rates increase by a factor of 2.1-2.4 for every 10°C temperature increase, which is within the typical range for temperate and subtropical ecosystems. A quadratic relationship was determined between soil moisture and CO₂ emissions: emissions are maximum when moisture is in the 20-30% range, and decrease at lower (< 15%) and higher (> 35%) moisture values. This nonlinear response reflects the dual constraints of drought stress and oxygen limitation on microbial activity and has important implications for predicting emission responses under changing precipitation regimes.

Carbon Balance. In the middle mountain belt (600-1200 m), the carbon balance is positive: +0.8 - +1.2 tC/ha/yr. In the lower mountain belt (200-600 m), the carbon balance is approximately neutral: -0.2 - +0.3 tC/ha/yr. In the high mountain belt (1200-1800 m), the carbon balance is +0.3 - +0.6 tC/ha/yr. The carbon balance on

northern slopes is 0.4-0.7 tC/ha/yr higher compared to southern slopes. These spatial patterns reflect the complex interplay between temperature, moisture, productivity, and decomposition across the landscape. The overall positive carbon balance in most areas indicates that these forests currently function as carbon sinks, but this status may be threatened under projected future climate scenarios.

Table 13. Comparison of soil carbon stocks in different subtropical forest ecosystems

Study	Region	Soil type / Vegetation cover	Depth (cm)	Carbon stock (tC/ha)
Our research	Lankaran-Astara	Brown mountain-forest	0–100	280–350
		Yellow mountain-forest	0–100	150–220
Vahedi et al., 2016	Iran, Nour Forest Park	Forest soils	0–40	70–120
Rasouli et al., 2025	Iran, Hirkan forests	Natural forest	0–15	99.4
		<i>Acer velutinum</i> plantation	0–15	95.2
Mousavi et al., 2025	Iran, Hirkan forests	<i>Alnus subcordata</i>	0–200	206.24
		<i>Quercus castaneifolia</i>	0–200	195.26

REFERENCES

- Anderson, J. P. E., & Domsch, K. H. (1978). A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 10(3), 215–221.
- Babayev, M. P., & Cəfərov, A. B. (2021). Lənkəran-Astara bölgəsinin torpaq örtüyü və onun coğrafi yayılması [Soil cover of the Lankaran-Astara region and its geographical distribution]. *Torpaqşünaslıq Jurnalı*, 2(15), 23–38.
- Babayev, M. P., & Qasimov, İ. S. (2020). Torpaq tədqiqatlarının metodları: Çöl və laborator analizlər [Methods of soil research: Field and laboratory analyses]. *Elm*.
- Bardgett, R. D., Freeman, C., & Ostle, N. J. (2008). Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME Journal*, 2(8), 805–814.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444–1449.
- Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165–173.
- Dixon, R. K., Solomon, A. M., Brown, S., Houghton, R. A., Trexler, M. C., & Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263(5144), 185–190.
- Epron, D., [et al.]. (2018). Separating the components of ecosystem respiration [Manuscript submitted for publication]. HAL Theses, Article tel-01748078.
- FAO. (2019). Ex-Ante Carbon Balance Tool (EX-ACT) version 9: Technical guidelines. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hüseynov, N. Ə., & Məmmədov, A. S. (2023). Lənkəran-Astara bölgəsinin iqlim xüsusiyyətləri və hidrotermik rejimi [Climatic characteristics and hydrothermal regime of the Lankaran-Astara region]. *Hidrometeorologiya və Ətraf Mühit Jurnalı*, 2(24), 34–48.
- IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

12. Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10(2), 423–436.
13. Kandeler, E., Kampichler, C., & Horak, O. (1996). Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities. *Biology and Fertility of Soils*, 23(3), 299–306.
14. Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220(1–3), 242–258.
15. Li, X., [et al.]. (2025). The dynamic processes of CO₂ migration as influenced by moisture and temperature in the arid sandy shrubland vadose zone. *Journal of Hydrology*, Article 132990.
16. LI-COR. (2019). LI-8100A automated soil CO₂ flux system & LI-8150 multiplexer instruction manual. LI-COR Biosciences.
17. Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., ... & Lexer, M. J. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698–709.
18. Мəммədov, Q. Ş., & Babayev, M. P. (2022). Lənkəran-Astara bölgəsinin coğrafi mövqeyi və relyef xüsusiyyətləri [Geographical location and relief features of the Lankaran-Astara region]. *Coğrafiya Jurnalı*, 1(18), 23–31.
19. Morison, J., Matthews, R., Miller, G., Perks, M., Randle, T., Vangelova, E., ... & Yamulki, S. (2012). Understanding the carbon and greenhouse gas balance of forests in Britain (Forestry Commission Research Report). Forestry Commission.
20. Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, ... & M. E. Sumner (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods* (pp. 961–1010). Soil Science Society of America.
21. Paul, E. A. (2014). *Soil microbiology, ecology and biochemistry* (4th ed.). Academic Press.
22. Pendall, E., [et al.]. (2024). Reconciling top-down and bottom-up estimates of ecosystem respiration in a mature eucalypt forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129(10), Article e2024JG008064.
23. Six, J., & Paustian, K. (2014). Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, A4–A9.
24. Smith, P., Cotrufo, M. F., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P. J., Elliott, J. A., ... & Scholes, M. C. (2014). Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *Soil Discussions*, 1(1), 661–695.
25. Tamuly, G. (2025). Impact of Elevated CO₂ and Temperature on Soil Carbon and Nitrogen Dynamics. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28(8), 461–479. <https://doi.org/10.9734/jabb/2025/v28i82721>
26. Yaghoubisis, M., Moshki, A., Asadiyan, M., & Mollashahi, M. (2025). Soil Physico-Chemical Properties and Below-Ground Carbon Storage: Insights from Natural Versus Plantation Forests in Northern Iran. *ECOPERSIA*, 13(3), 253–265.

The article was received 02.01.26, received after revision 02.02.26, accepted 03.03.26

Т. Ахадов

ВПЛИВ ГЛОБАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ВУГЛЕЦЕВИЙ БАЛАНС ГІРСЬКО-ЛІСОВИХ ҐРУНТІВ ЛЕНКОРАНСЬКО-АСТАРІНСЬКОГО РЕГІОНУ

Анотація. Дослідження присвячене вивченню впливу глобальних кліматичних змін на вуглецевий баланс гірсько-лісових ґрунтів Ленкорансько-Астаринського регіону. Ця унікальна екосистема, що є частиною Гірканських лісів, включена до Списку всесвітньої спадщини ЮНЕСКО. Дослідження проводилися у 2023–2025 роках на південно-східних схилах Талишських гір на висотах від 200 до 1800 метрів над рівнем моря. У зразках ґрунту визначали загальний вуглець, органічний вуглець,

викиди CO₂, а також фізико-хімічні показники; для кліматичних прогнозів використовували сценарії RCP. Результати показали, що за останні 50 років середньорічна температура підвищилася на 1,2°C, а кількість опадів зменшилася на 8–10%. За прогнозами, до 2100 року температура може зрости на 2,5–4,5°C, а кількість опадів може зменшитися на 15–20%. Загальні запаси вуглецю в ґрунтах становлять від 120 до 380 т С/га. Найвищі значення спостерігаються у гірсько-лісових бурих ґрунтах (320–380 т С/га) та на північних схилах. Викиди CO₂ коливаються від 0,8 до 3,2 г С/м²/добу, причому максимальні значення зафіксовано в літні місяці. Встановлено високий позитивний кореляційний зв'язок ($r = +0,72$) між викидами CO₂ та температурою ґрунту. Під впливом кліматичних змін прогнозується збільшення викидів CO₂ на 25–45% та зменшення запасів органічного вуглецю в ґрунті на 15–30% до 2100 року. Ці зміни можуть становити загрозу для екосистемної стійкості Гірканських лісів. Отримані результати можуть слугувати науковою основою для розроблення заходів адаптації до кліматичних змін та управління лісами.

Ключові слова: глобальні кліматичні зміни, вуглецевий баланс, викиди CO₂, гірсько-лісові ґрунти, Гірканські ліси.

Стаття надійшла до редакції 02.01.26, надійшла після рецензування 02.02.26, прийнята 03.03.26

Ахадов Турал

доктор філософії, Інститут географії Міністерства науки та освіти Азербайджанської Республіки

Адреса робоча: AZ1073, Азербайджан, м. Баку, пр. Г. Джавіда, 117

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-6277-7136>

УДК 504.054:504.06(477.8)

Angelina Chugai, Doctor of Science (Technical), Professor, Head of the Department of Environmental Science and Environmental Protection

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8091-8430> **e-mail:** avchugai@ukr.net

Maksym Nedostrelov, Postgraduate student of the Department of Environmental Science and Environmental Protection

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-5407-811X> **e-mail:** maximnedostrev@gmail.com

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

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF TECHNOGENIC LOAD ON THE ENVIRONMENT OF WESTERN UKRAINE REGIONS

Abstract. *Today, all natural components of the environment are under technologic pressure. This impact has intensified significantly in the last few years due to the military conflict in Ukraine. When assessing the technogenic impact on the environment, methods are used to evaluate individual components of the environment or to conduct a comprehensive assessment. In scientific literature, the vast majority of works are devoted to assessing the impact on individual components of the environment.*

The purpose of the study was to develop a method for comprehensive assessment of technogenic load on the environment and to test it on the example of regions of Western Ukraine. Based on preliminary assessments of technogenic load on individual components of the environment, a number of indicators for comprehensive assessment (8 parameters) were determined. Weight coefficients for each of the assessment indicators were determined. A calculation formula for determining the comprehensive indicator of technogenic load (CILT) and an assessment scale of load levels were proposed.

The methodology was tested for regions of Western Ukraine based on research data from 2009 to 2023. The determination of weight coefficients showed that the most significant among various types of impact are waste accumulation in regions, emissions of pollutants into the air basin, and volumes of discharges of substances with wastewater. It was found that for different regions of Western Ukraine, the overall level of pollution is significantly influenced by the indicators of emissions and discharges of pollutants, waste accumulation, and the presence of landfills and waste disposal sites. The maximum values of the CILT are observed in the Lviv and Ivano-Frankivsk regions, with a significant impact also observed in the smallest Chernivtsi region. In the vast majority of regions, the level of technogenic load was characterized as insignificant, in the Ivano-Frankivsk and Chernivtsi regions – as average, and in the Lviv region – as elevated.

The proposed methodology can be recommended for implementation in the practical activities of state environmental protection agencies when analyzing the state of the environment in regions.

Keywords: *comprehensive indicator, technogenic load, environment, weight coefficient.*

А.В. Чугай, М.В. Недострелов

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

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ РЕГІОНІВ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ

***Анотація.** На даний час техногенного навантаження зазнають всі природні складові довкілля. Вплив значно посилюється в останні роки через бойові дії в Україні. При оцінці техногенного впливу на довкілля використовуються методи оцінки на окремі складові довкілля або комплексної оцінки. У науковій літературі переважна більшість робіт присвячена оцінці впливу на окремі складові довкілля.*

Метою дослідження була розробка методу комплексної оцінки техногенного навантаження на довкілля та його апробація на прикладі регіонів Західної України. На основі попередніх оцінок техногенного навантаження на окремі складові довкілля було визначено перелік показників комплексної оцінки (8 параметрів). Визначено вагові коефіцієнти кожного з оціночних показників. Запропоновано розрахункову формулу для визначення комплексного показника техногенного навантаження (КПТН) і оціночну шкалу рівнів навантаження.

Апробація методики виконана для регіонів Західної України за даними досліджень у 2009–2023 рр. Визначення вагових коефіцієнтів показало, що найбільш значимими серед різних видів впливу є накопичення відходів в регіонах, викиди забруднюючих речовин у повітряний басейн, обсяги скидів речовин зі зворотними водами. Отримано, що для різних областей Західної України на формування загального рівня навантаження значний вплив мають показники викидів та скидів забруднюючих речовин, накопичення відходів, наявності місць розміщення звалищ та полігонів відходів. Максимальні значення КПТН відзначаються для Львівської та Івано-Франківської областей, значний вплив відзначається і для найменшої Чернівецької області. У переважній більшості областей рівень техногенного навантаження характеризувався як незначний, у Івано-Франківській і Чернівецькій областях – як середній, у Львівській – як підвищений.

Запропонована методика може бути рекомендована до впровадження у практичну діяльність державних природоохоронних органів при аналізі стану довкілля в регіонах.

***Ключові слова:** комплексний показник, техногенне навантаження, довкілля, ваговий коефіцієнт.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.20-28>

Вступ

Відомо, що техногенне навантаження – це ступінь впливу господарської діяльності на довкілля в цілому або його окремі компоненти. На даний час техногенного навантаження зазнають всі природні складові довкілля. Цей вплив також значно посилюється в останні роки через бойові дії, які тривають в Україні.

При оцінці техногенного впливу на довкілля можна використовувати методи оцінки на окремі складові довкілля (атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунтовий покрив і геологічне середовище) або методи комплексної оцінки.

Відзначимо, що у науковій літературі переважна більшість робіт присвячена оцінці впливу із застосуванням першої групи методів. Методи

комплексної оцінки застосовуються менше. Огляд літературних джерел показує, що методи комплексної оцінки зазвичай засновані на використанні стандартного набору показників (викиди забруднюючих речовин (ЗР), скиди, утворення відходів, показники забруднення та ін.) [1–3]. Розроблено методи щодо оцінки навантаження з урахуванням наявності об'єктів критичної транспортної інфраструктури [4], для окремих господарських об'єктів тощо [5].

У зарубіжній практиці також є різні методи до оцінки техногенного навантаження. Одним з підходів є оцінка навантаження на довкілля через викиди парникових газів і, як наслідок, зміни клімату, що відбуваються [6]. Детальний перелік та опис методів оцінки впливу на довкілля в цілому наведено у рекомендаціях [7] і роботі [8]. Прикладом комплексної оцінки стану вод і ґрунтів є модель оцінки ґрунтів і води (SWAT) [9]. На принципах комплексної оцінки також побудовані методики оцінки стану довкілля в регіонах на засадах сталого розвитку [10, 11].

Метою роботи є розробка методу комплексної оцінки техногенного навантаження на довкілля та його апробація на прикладі регіонів Західної України.

Методика дослідження

Для оцінки техногенного навантаження на складові довкілля регіонів Західної України було використано декілька методик. Кожна з них враховує показники, які окремо характеризують рівень техногенного впливу і відрізняються складовими, що використовуються для оцінки. Було виконано оцінку навантаження на атмосферне повітря, водні об'єкти і ґрунтовий покрив (результати висвітлено у публікаціях авторів).

Аналіз отриманих результатів і фізичної сутності показників слугував основою для розробки методики комплексної оцінки техногенного навантаження на довкілля. В результаті визначено такий перелік показників комплексної оцінки:

- 1) модуль техногенного навантаження на повітряний басейн $M_{ПВ}$ [2];
- 2) показник небезпечності структури викидів HCB [12];
- 3) комплексний коефіцієнт оцінки ефективності водокористування K [2];
- 4) модуль техногенного навантаження на водні об'єкти $M_{ВО}$ за обсягами скидів стічних вод (СВ) [2];
- 5) модуль техногенного навантаження на водні об'єкти $M_{ВО}$ за обсягами скидів ЗР у складі СВ [2];
- 6) модуль техногенного навантаження на геологічне середовище $M_{ГС}$ за показниками утворення відходів [2];
- 7) модуль техногенного навантаження на геологічне середовище $M_{ГС}$ за показниками накопичення відходів [2];
- 8) показник побутових відходів $P_{пв}$ [3].

Враховуючи, що фізична сутність показників різниться, для отримання порівняних результатів був застосований принцип лінійного нормування. Всі отримані нормовані значення змінювались в діапазоні від 0 до 1 за умови, що мінімальний техногенний вплив характеризується нульовими значеннями.

Із застосуванням показника варіації [13] було визначено вагові коефіцієнти кожного з оціночних показників (табл. 1).

Так, комплексний показник техногенного навантаження на довкілля (*КПТН*) розраховується за формулою:

$$КПТН = 0,14M_{ПБ} + 0,09HCB + 0,07K + 0,11M_{ВО}(СВ) + 0,14M_{ВО}(ЗР) + 0,11M_{ГС}(утвор) + 0,25M_{ГС}(накоп) + 0,09P_{не}, \quad (1)$$

де $M_{ПБ}$, HCB , K , $M_{ВО}(СВ)$, $M_{ВО}(ЗР)$, $M_{ГС}(утвор)$, $M_{ГС}(накоп)$, $P_{не}$ – нормовані значення відповідних показників оцінки.

Для *КПТН* було запропоновано оціночну шкалу (табл. 2).

Таблиця 1. Вагові коефіцієнти показників комплексної оцінки

Показник	Ваговий коефіцієнт
$M_{ПБ}$	0,14
HCB	0,09
K	0,07
$M_{ВО}$ за обсягами скидів СВ	0,11
$M_{ВО}$ за обсягами скидів ЗР у складі СВ	0,14
$M_{ГС}$ за показниками утворення відходів	0,11
$M_{ГС}$ за показниками накопичення відходів	0,25
$P_{не}$	0,09

Таблиця 2. Рівні техногенного навантаження за значенням *КПТН*

Значення <i>КПТН</i>	Рівень навантаження
0 – 0,25	незначний
> 0,25 – 0,5	середній
> 0,5 – 0,75	підвищений
> 0,75 – 1,0	високий

Результати дослідження

Оцінка техногенного навантаження на складові довкілля регіонів Західної України виконувалась за період 2009–2023 рр. Нами було визначено окремі показники, які характеризують рівень техногенного впливу, проведено аналіз динаміки зміни кожного з показників.

Зазначимо, що оцінка техногенного навантаження на окремі складові також є важливою задачею. Досить часто дослідники вивчають стан певних природних середовищ. Але при оцінці стану для значної кількості регіонів більш доцільним є використання інтегральних або комплексних показників.

Визначення вагових коефіцієнтів для показників показало, що більш значними серед різних видів впливу є накопичення відходів в регіонах, викиди ЗР у повітряний басейн, а також обсяги скидів ЗР зі зворотними водами. Також відзначимо, що при розрахунку HCB було використано дані про викиди лише основних ЗР. Можливо, при використанні більш повного переліку ЗР ваговий коефіцієнт цього показника буде уточнений.

На рис. 1 наведено результати комплексної оцінки з урахуванням внеску кожного окремого показника.

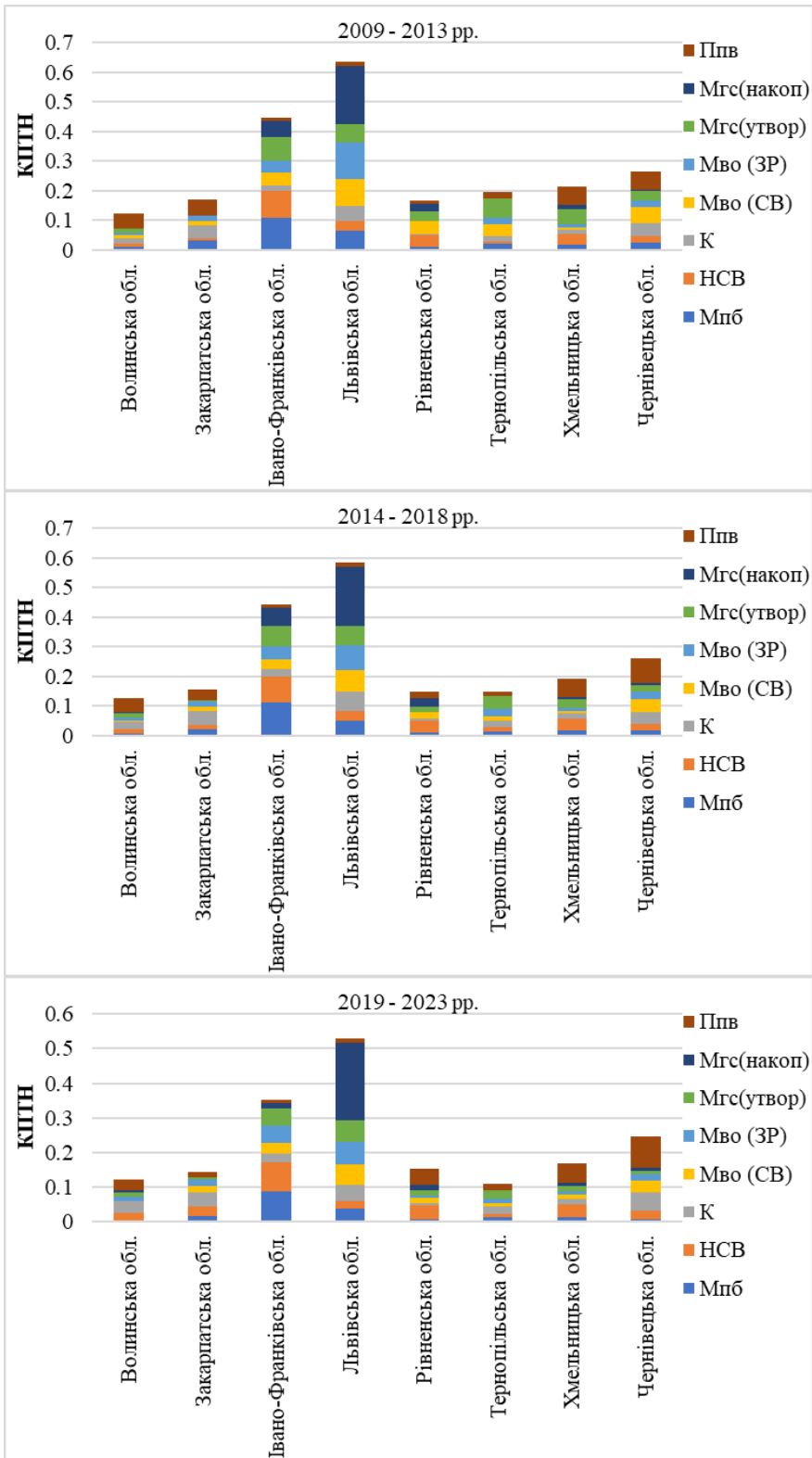


Рисунок 1. Комплексна оцінка техногенного навантаження на довкілля в регіонах Західної України

Як видно, показники, які найбільш впливають на формування загального рівня навантаження, по регіонах різняться. Так, в різні роки значний вплив мають такі показники:

- P_{ns} – Волинська, Закарпатська, Хмельницька і Чернівецька області;
- K – Волинська, Закарпатська і Чернівецька області;
- $M_{BO}(ЗР)$ – Львівська обл.;
- $M_{ГС}(накоп)$ – Львівська обл.;
- $M_{ПБ}$ – Івано-Франківська обл.;
- $M_{ГС}(утвор)$ – Івано-Франківська і Тернопільська обл.

На рис. 2 наведено динаміку зміни $KПТН$ для регіонів Західної України, у табл. 3 – результати оцінки на основі табл. 2.

Як видно з рис. 2, максимальні показники техногенного навантаження відзначаються для Львівської та Івано-Франківської областей. Також слід відзначити значний рівень впливу на довкілля у Чернівецькій області, хоча регіон є фактично найменшим за площею серед західних областей. Така ситуація обумовлена високими відносними показниками викидів ЗР, умовами водокористування в регіоні, а також збільшенням площ розміщення відходів. Слід також відзначити, що незважаючи на загальне збільшення несприятливого впливу на довкілля в останні роки, рівень техногенного навантаження в регіонах Західної України в цілому зменшився.

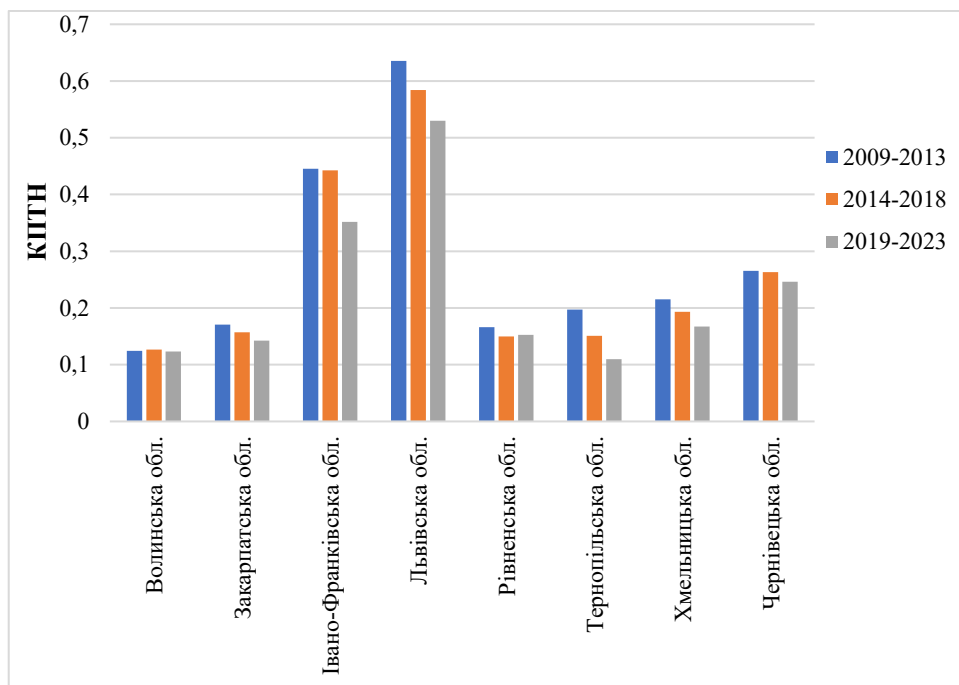


Рисунок 2. Динаміка зміни $KПТН$ для регіонів Західної України у 2009–2023 рр.

Аналіз табл. 3 свідчить, що у переважній більшості областей рівень техногенного навантаження характеризувався як незначний. У Івано-Франківській і Чернівецькій (2009–2018 рр.) областях навантаження характеризувалось категорією «середній», у Львівській – «підвищений».

Висновки

У роботі представлені результати апробації методики комплексної оцінки техногенного навантаження на довкілля на прикладі регіонів Західної України. Проведене дослідження дозволяє зробити такі висновки:

- в Україні переважна більшість наукових досліджень щодо оцінки техногенного впливу виконується із застосуванням методів оцінки на окремі складові довкілля;
- оцінка техногенного навантаження на окремі складові довкілля регіонів Західної України із застосуванням різних показників дозволила визначити набір параметрів для розробки методики комплексної оцінки;
- запропоновано методику визначення комплексного показника техногенного навантаження та оціночну шкалу для визначення рівня навантаження;

Таблиця 3. Класифікація рівнів техногенного навантаження для регіонів Західної України за значенням *КПТН*

Область	2009–2013 рр.	2014–2018 рр.	2019–2023 рр.
Волинська обл.	0,12 (незначний)	0,13 (незначний)	0,12 (незначний)
Закарпатська обл.	0,17 (незначний)	0,16 (незначний)	0,14 (незначний)
Івано-Франківська обл.	0,45 (середній)	0,44 (середній)	0,35 (середній)
Львівська обл.	0,64 (підвищений)	0,58 (підвищений)	0,53 (підвищений)
Рівненська обл.	0,17 (незначний)	0,15 (незначний)	0,15 (незначний)
Тернопільська обл.	0,20 (незначний)	0,15 (незначний)	0,11 (незначний)
Хмельницька обл.	0,22 (незначний)	0,19 (незначний)	0,17 (незначний)
Чернівецька обл.	0,27 (середній)	0,26 (середній)	0,25 (незначний)

- найбільш значними серед різних видів впливу є показники накопичення відходів в регіонах, викиди ЗР у повітряний басейн, обсяги скидів ЗР зі зворотними водами;
- для різних областей Західної України на формування загального рівня навантаження значний вплив мають показники викидів ЗР, скидів ЗР у складі СВ у водні об'єкти, накопичення відходів, наявності місць розміщення звалищ та полігонів відходів;
- максимальні значення *КПТН* відзначаються для Львівської та Івано-Франківської областей, також значний вплив відзначається для найменшої Чернівецької області;
- у переважній більшості областей рівень техногенного навантаження характеризувався як незначний, у Івано-Франківській і Чернівецькій – як середній, у Львівській – як підвищений.

Розроблена методика може бути рекомендована до впровадження у практичну діяльність державних природоохоронних органів при аналізі стану довкілля в регіонах, а також визначенні найбільш значущих факторів, які формують рівень техногенного навантаження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гончаренко, Т.П., Жицька, Л.І., & Плахотня, Л.І. (2019). Комплексна оцінка техногенного впливу на довкілля по регіонах України. *Вісник ЧДТУ. Технічні науки*, 24 (2), 117–125. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2019.167801>
2. Чугай, А.В., & Сафранов, Т.А. (2021). *Методи оцінки техногенного впливу на довкілля. Навчальний посібник*. Одеса: Букаєв Вадим Вікторович.
3. Васенко, О.Г., Рибалова, О.В., Артем'єв, С.Р., Горбань, Н.С., Коробкова, Г.В., Полозенцева, В.О., Козловська, О.В., Мацак, А.О., & Савічев, А.А. (2015). *Інтегральні та комплексні оцінки стану навколишнього природного середовища: монографія*. Харків: НУГЗУ.
4. Іванюта, С.П. (2017). *Наукові основи оцінки ризиків і загроз екологічній безпеці регіонів України: дис. на здобуття наукового ступеня д-ра т. наук: 21.06.01 / НТУ України «Київський політехнічний інститут»*. Київ.
5. Козуля, Т.В., & Коршунов, С.Є. (2024). Комплексна система екологічного контролю техногенної безпеки господарських об'єктів на прикладі АЗС. *Техногенно-екологічна безпека*, 15 (1), 36–45. <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2024.1.3>
6. Lu, Y., Shao, Z., & Lu H. (2024). Quantification of anthropogenic heat and simulation of its effects on environment and climate: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 204, 114802. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114802>
7. Best Environmental Impact Assessment (EIA) – Everything You Need to Know to Get Started. <https://assessmentstools.com/environmental-impact-assessment/>
8. Vishwakarma, R.C., Singh, P.K., & Singh Y. (2025). Methods and Applications of Environmental Impact Assessment. *Energy, Ecology, and Environment: Fundamentals and Applications*, 183–200. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15976287>
9. SWAT. Soil & Water Assessment Tool. <https://swat.tamu.edu/>
10. Chugai, A.V., Safranov, T.A., Pylypiuk, V.V., & Soloshych I.O. (2021). Assessment of the Environmental State of North-Western Black Sea Coast Territories, Ukraine using Indicators of Sustainable Development. *Ecologia Balkanica*, 13 (1), 17–26.
11. Frameworks to Measure Sustainable Development (2000). OECD. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2000/02/frameworks-to-measure-sustainable-development_g1ghg252/9789264180635-en.pdf
12. Горський, А. (2021). Оцінка техногенного впливу стаціонарних джерел забруднення на стан повітряного басейну Київської агломерації. *Економіка природокористування і сталий розвиток*, 9, 72–79. [https://doi.org/10.37100/2616-7689.2021.9\(28\).10](https://doi.org/10.37100/2616-7689.2021.9(28).10)
13. Гуляк, Р.Е. (2012). Методи визначення вагових коефіцієнтів при розрахунку таксономічних показників. *Сталий розвиток міст. Управління проектами і програмами міського і регіонального розвитку*. <https://eprints.kname.edu.ua/29737/1/44.pdf>

Стаття надійшла до редакції 18.12.25, надійшла після рецензування 06.02.26, прийнята 06.03.26

REFERENCES

1. Goncharenko, T.P., Zhitskaya, L.I., & Plachotnja, L.I. (2019). Comprehensive assessment of man-caused impact on environment in the regions of Ukraine. *Bulletin of CSTU. Technical Sciences*, 24 (2), 117–125. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2019.167801>. [in Ukrainian]
2. Chugai, A.V., & Safranov, T.A. (2021). *Methods for assessing the impact of human activity on the environment. Textbook*. Odessa: Bukayev, Vadim Viktorovich. [in Ukrainian]
3. Vashenko, O.G., Rybalova, O.V., Artemiev, S.R., Gorbun, N.S., Korobkova, G.V., Polozentsova, V.O., Kozlovska, O.V., Matsak, A.O., & Savichev, A.A. (2015). *Integral and comprehensive assessments of the state of the natural environment: monograph*. Kharkiv: NUGS. [in Ukrainian]
4. Ivanyuta, S.P. (2017). *Scientific foundations for assessing risks and threats to the environmental safety of Ukraine's regions: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: 21.06.01 / National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute."* Kyiv. [in Ukrainian]
5. Kozulia, T., & Korshunov, S. (2024). Complex system of ecological control for business objects technological safety of petrol station as example. *Technogenic and Ecological Safety*, 15 (1), 36–45. <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2024.1.3>. [in Ukrainian]
6. Lu, Y., Shao, Z., & Lu H. (2024). Quantification of anthropogenic heat and simulation of its effects on environment and climate: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 204, 114802. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114802>
7. Best Environmental Impact Assessment (EIA) – Everything You Need to Know to Get Started. <https://assessmentstools.com/environmental-impact-assessment/>
8. Vishwakarma, R.C., Singh, P.K., & Singh Y. (2025). Methods and Applications of Environmental Impact Assessment. *Energy, Ecology, and Environment: Fundamentals and Applications*, 183–200. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15976287>
9. SWAT. Soil & Water Assessment Tool. <https://swat.tamu.edu/>
10. Chugai, A.V., Safranov, T.A., Pylypiuk, V.V., & Soloshych I.O. (2021). Assessment of the Environmental State of North-Western Black Sea Coast Territories, Ukraine using Indicators of Sustainable Development. *Ecologia Balkanica*, 13 (1), 17–26.
11. Frameworks to Measure Sustainable Development (2000). OECD. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2000/02/frameworks-to-measure-sustainable-development_g1ghg252/9789264180635-en.pdf
12. Gorsky, A. (2021). Assessment of the technogenic impact of stationary sources of pollution on the condition of the air pool of the Kyiv agglomeration. *Nature management economics and sustainable development*, 9, 72–79. [https://doi.org/10.37100/2616-7689.2021.9\(28\).10](https://doi.org/10.37100/2616-7689.2021.9(28).10). [in Ukrainian]
13. Gulyak, R.E. (2012). Methods for determining weight coefficients when calculating taxonomic indicators. *Sustainable urban development. Management of urban and regional development projects and programs*. <https://eprints.kname.edu.ua/29737/1/44.pdf>

The article was received 18.12.25, received after revision 06.02.26, accepted 06.03.26

Чугай Ангеліна Володимирівна

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони довкілля Одеського національного університету імені І.І. Мечникова

Адреса робоча: 65082 Україна, м. Одеса, вул. Всеволода Змієнка, 2

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8091-8430> **e-mail:** avchugai@ukr.net

Недострелов Максим Валентинович

аспірант кафедри екології та охорони довкілля Одеського національного університету імені І.І. Мечникова

Адреса робоча: 65082 Україна, м. Одеса, вул. Всеволода Змієнка, 2

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-5407-811X> **e-mail:** maximnedostrev@gmail.com

УДК 502.628:504.052

Andrii Buchka, PhD student of Ecology and Environmental Protection Department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1447-9027> **e-mail:** andriibuchka@gmail.com

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

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

PHOTOVOLTAIC PANEL WASTE: FACTORS, RISKS AND FORECAST OF ACCUMULATION

Abstract. *The article is devoted to the analysis of the processes and prospects of photovoltaic panel waste generation in the context of the intensive development of solar energy. The aim of the study is to assess and forecast the generation of photovoltaic panel waste as a component of waste electrical and electronic equipment, and to identify the main problems and risks associated with the accumulation of this waste in the environment. The research methods include the analysis and systematization of information on assessing factors and forecasting photovoltaic panel waste generation based on different models.*

The study of the panel waste growth under various scenarios, including to the overall electronic waste flow, has shown that the volume and share of such waste are increasing rapidly. In 2014, the share of photovoltaic panel waste in the total amount of waste electrical and electronic equipment was 0.1%; in 2022 – 1%. However, by 2030, the annual volume of panel waste is projected to reach 2.4 million tonnes, and by 2050 – 6.5 million tonnes, which corresponds to 3% and 6% of the projected total amount of waste electrical and electronic equipment. The main reasons for panel waste generation are the approved average lifespan of 25 years, premature degradation of the encapsulant, extreme weather conditions, early modernization of operating panels, etc.

The structural features of panels that influence their resource potential and recycling complexity are considered. The main barriers to effective waste management are identified: underdeveloped recycling infrastructure, complex panel structure, low profitability of valuable component extraction, and others.

The theoretical significance of the presented study is in the systematization of information on photovoltaic panel waste generation, including projections up to 2050 based on various models. According to the obtained results, the volume of waste will grow rapidly, and under conditions of low recycling rates, this will lead to the accumulation of such waste in the environment and, consequently, to contamination with toxic components from the waste. The practical significance of the obtained results is in substantiating the need to develop sustainable models for the use of panels and waste management to prevent significant risks in the future.

The value of the study is in the comprehensive comparison of photovoltaic panel waste growth forecasts, including in relation to the dynamics of the overall flow of electronic waste. Further research may be aimed at improving recycling systems and developing effective policies for photovoltaic panel waste management.

Keywords: *waste electrical and electronic equipment, recycling, management, photovoltaic module.*

А.В. Бучка, В.Ю. Приходько

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

ВІДХОДИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ: ФАКТОРИ, РИЗИКИ ТА ПРОГНОЗ НАКОПИЧЕННЯ

***Анотація.** Стаття присвячена аналізу процесів та перспектив утворення відходів фотоелектричних панелей в умовах інтенсивного розвитку сонячної енергетики. Метою дослідження є оцінка та прогнозування утворення відходів фотоелектричних панелей як складової частини відходів електричного та електронного обладнання, визначення основних проблем та ризиків, пов'язаних з накопиченням даних відходів у довкіллі. Методи дослідження полягають у аналізі та систематизації інформації щодо оцінки факторів та прогнозування утворення відходів фотоелектричних панелей за різними моделями.*

Дослідження динаміки росту обсягів відходів панелей за різними сценаріями, в тому числі відносно динаміки зростання загального потоку електронних відходів, показали, що кількість та частка таких відходів швидко зростають. Так, у 2014 році частка відходів фотоелектричних панелей у загальній масі відходів електричного та електронного обладнання склала 0,1%; в 2022 році – 1%. Проте на період до 2030 року прогнозується збільшення річного обсягу відходів панелей до 2,4 млн т, та до 2050 року - до 6,5 млн т, що відповідає 3% та 6% від прогнозованої загальної маси відходів електричного та електронного обладнання. Основними причинами утворення відходів панелей є затверджені у середньому 25-річний термін експлуатації, передчасна деградація інкапсулянта та екстремальні погодні умови, дострокова модернізація працюючих панелей тощо.

Розглянуто конструкційні особливості панелей, що впливають на їхній ресурсний потенціал і складність утилізації. Визначено основні бар'єри ефективного управління такими відходами: недосконала інфраструктура переробки, складність структури панелей, низька рентабельність вилучення цінних компонентів і інші.

Теоретичне значення представлено дослідження полягає в систематизації інформації щодо утворення відходів фотоелектричних панелей, в т.ч. на перспективу до 2050 року за різними моделями. За отриманими результатами, кількість відходів буде стрімко зростати, що, за умов низького рівня переробки, призведе до накопичення таких відходів у довкіллі, отже, до забруднення токсичними компонентами, що є у складі відходів. Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні необхідності розробки сталих моделей використання панелей та поводження з відходами для попередження значних ризиків у майбутньому.

Цінність дослідження полягає у комплексному зіставленні результатів прогнозів зростання відходів фотоелектричних панелей, в тому числі в порівнянні із динамікою загального потоку електронних відходів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на удосконалення систем переробки та формування ефективної політики управління відходами фотоелектричних панелей.

Ключові слова: відходи електричного та електронного обладнання, переробка, управління, фотоелектричний модуль.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.29-44>

Вступ

Розвиток людства нерозривно пов'язаний із постійним зростанням споживання енергії, що закономірно призводить до збільшення залежності від традиційних енергоресурсів, таких як вуглеводні та ядерне паливо. Екологічні ризики та проблеми, пов'язані з використанням викопного палива, полягають у забрудненні довкілля продуктами горіння, в т.ч. парниковими газами, утворенні радіоактивних відходів та виснаженні запасів корисних копалин. Ці виклики змушують людство до пошуку та впровадження альтернативних джерел енергії. Світовою спільнотою заявлений шлях відмови від викопного палива та переходу до відновлювальних джерел енергії. Так, в 2023 році на кліматичній конференції ООН (COP 28) та саміті G20 в Нью-Делі країни зобов'язалися втричі збільшити потужності відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) до 2030 року з метою обмежити зростання середньої температури до 1,5 °C відносно доіндустріального рівня [1, 2]. Інвестиції у відновлювальну енергетику підтверджують ці наміри, хоч і спостерігається регіональна диспропорція у фінансуванні. Так, протягом 2023 року світові інвестиції у впровадження нових потужностей ВДЕ досягли 570 млрд доларів США, що перевищує показник 2022 р. на 27%, з найбільшими осередками фінансування в Китаї, США, Бразилії та Індії [1].

Одним із ключових напрямів переходу від традиційних до ВДЕ є сонячна енергетика, яка є найбільш динамічно зростаючою галуззю відновлювальної енергетики в світі. У 2023 році частка встановлених нових потужностей склала 77% від загального встановленого обсягу ВДЕ. В той же час, частка виробленої фотоелектричними панелями (ФЕП) електроенергії склала 5,4% від глобальної генерації електроенергії [3].

Виробництво фотоелектричних модулів у 2023 році досягло рекордних 612 ГВт, що на 38% більше, ніж у 2022 році, і на цілих 60% більше, ніж у 2021 році (рис. 1) [4].

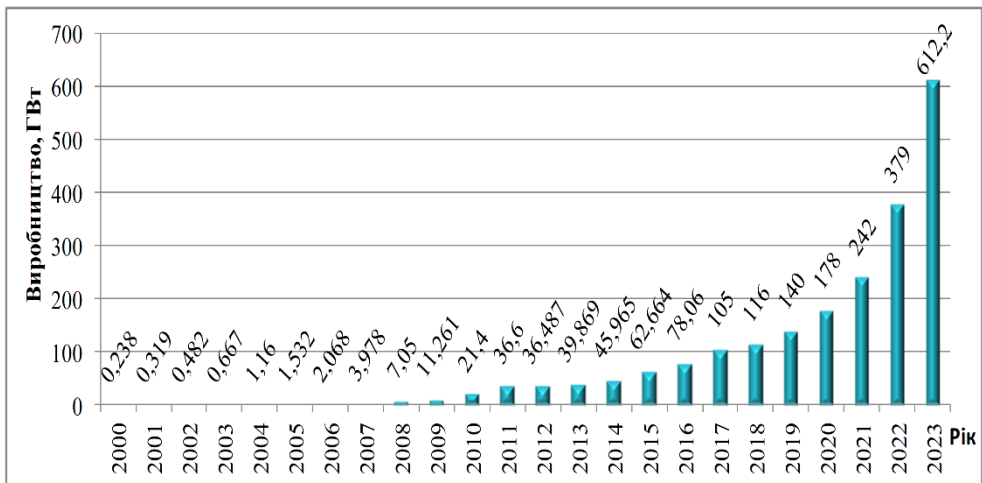


Рис. 1. Динаміка зростання виробництва фотоелектричних панелей у світі за 2000-2023 роки [4]

Провідне місце в розвитку глобальної сонячної енергетики займає Китай, утримуючи лідируючі позиції як з виробництва, так і зі встановлення фотоелектричних модулів. У 2023 році його частка склала 84,6% від світового виробництва модулів [5], а загальна встановлена потужність ФЕП досягла 649 ГВт [6]. Відповідно до оновлених даних Міжнародного енергетичного агентства (International Energy Agency, IEA), у 2024 році сукупна потужність всіх ФЕП у Китаї перевищила позначку в 1 ТВт ($\approx 1048,5$ ГВт), що становить 46,7% від загальної встановленої потужності ФЕП у світі [7].

Такий результат став можливим завдяки масштабній державній підтримці та стимулюванню розвитку відновлювальної енергетики, розвитку та вдосконаленню виробничої інфраструктури і доступу до запасів сировинних ресурсів. Для порівняння зауважимо, що друге місце за виробництвом модулів у 2023 році належало В'єтнаму з часткою лише в 3,4% [5]. Отже, Китай має беззаперечне домінування у глобальному впровадженні сонячної енергетики, що, в свою чергу, обумовлює значний вплив Китаю на виробничий та екологічний напрями розвитку даної галузі в цілому.

За даними IEA [7], у 2024 році в світі було змонтовано 602 ГВт потужностей сонячних електростанцій, досягнувши сумарної встановленої потужності ФЕП в 2,3 ТВт (рис. 2). Частка Китаю склала 59% від нових встановлених генерацій.

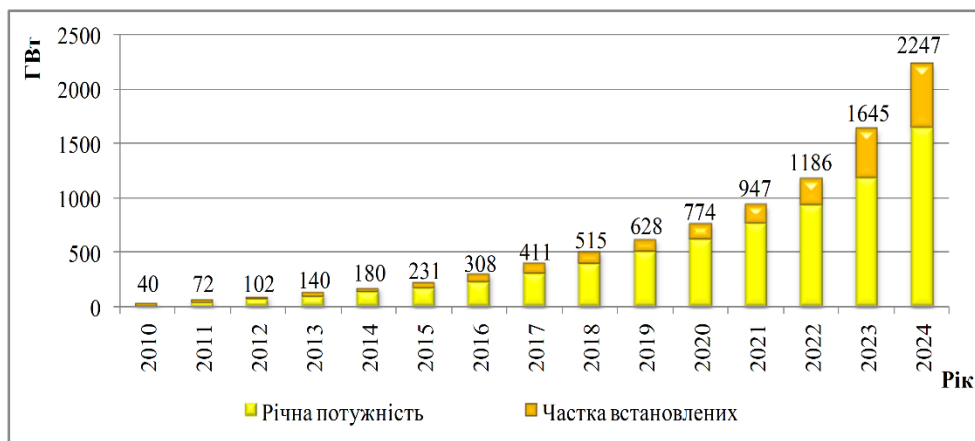


Рис. 2. Динаміка зростання сумарної потужності фотоелектричних панелей у світі за 2010-2024 роки (побудовано на основі даних [7])

Проте така тенденція динамічного розвитку сонячної енергетики має зворотну сторону – це утворення відходів ФЕП та закономірне зростання обсягів їх накопичення. ФЕП класифікуються як відходи електричного та електронного обладнання (ВЕЕО). ВЕЕО вже стали глобальною проблемою, так як є найбільш зростаючою категорією відходів у світі. За даними звіту Global E-waste Monitor 2024 [8], у 2022 році було утворено приблизно 62 млн т таких відходів, і лише 22% задокументовані як такі, що офіційно перероблені. Станом на 2022 р., частка відходів ФЕП складає 0,6 млн т від загальної маси відходів. В середньому, термін експлуатації ФЕП становить 25-30 років, після чого їх використання вважається економічно недоцільним. Втрата ефективності панелей через деградацію матеріалів та механічні пошкодження пришвидшує їх вихід з експлуатації. Тож в 2030-х роках очікується різке

зростання відходів ФЕП, які наближаються до завершення свого терміну експлуатації. За прогнозами [8], в 2030 році утвориться близько 2,4 млн т відходів ФЕП, і це значення буде постійно зростати відповідно до встановлених установок генерації. Виходячи з обсягів попередніх установок та темпів розвитку сонячної енергетики, відходи ФЕП з часом стануть однією з найбільших складових потоку ВЕЕО.

Невідповідне управління відходами ФЕП створює потенційні екологічні ризики, в тому числі через вміст небезпечних речовин і, відповідно, прогнозований обсяг даних відходів. Проте ефективне управління цими потоками через переробку відходів та відновлення компонентів дозволяє як зменшити негативний вплив на довкілля, так і використовувати повторно цінні матеріали. Актуальність представленого дослідження обумовлена необхідністю у своєчасній підготовці до майбутнього зростання обсягів відходів ФЕП з метою запобігання появи і посиленню еколого-економічних наслідків впровадження сонячної енергетики. Управління ВЕЕО в розрізі проблеми зростання відпрацьованих ФЕП полягає у формуванні глобальної інфраструктури для збору, переробки та повторного використання вилучених компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика управління відходами ФЕП протягом останнього десятиліття привертає все більше уваги міжнародних організацій та представників наукової спільноти. Так, у 2016 році Міжнародне агентство з відновлювальної енергетики (International Renewable Energy Agency, IRENA) в співпраці з програмою IEA-PVPS представили світу прогноз щодо обсягів утворення відходів ФЕП, попереджаючи про поступове, але невідворотне утворення та накопичення десятків мільйонів тонн панелей, які вийдуть з ладу до середини цього століття [9]. Деякі аналітики прогнозують, що в разі впровадження сценарію розвитку сонячної енергетики в рамках інтенсивного розвитку ВДЕ обсяг відходів ФЕП може зрости понад 200 млн т [10], тоді як у 2022 році фактично утворено 0,6 млн т відходів ФЕП [8]. В аналітичних звітах IRENA зазначається, що, відповідно до «сценарію 1,5 °C», до 2050 року сукупна потужність встановлених ФЕП може досягти десятків терават. Тому наголошується, що за відсутності своєчасного запровадження належних комплексних заходів з утилізації відпрацьованих ФЕП даний тип відходів перетвориться на один із найвагоміших типів енергетичних відходів вже в найближчі десятиліття. Це також вплине на загальне утворення ВЕЕО [10].

Паралельно з прогнозуванням утворення обсягів відходів ФЕП, все більше уваги приділяється питанню необхідності їх переробки. Розглядаються можливості вилучення і повернення у виробничий цикл матеріалів та зменшення негативного впливу на довкілля. Так, Mirletz та ін. [11] зазначають, що оптимізація переробки і створення ефективних систем, які полягають у повторному використанні матеріалів, вилучених з відходів ФЕП, є однією з основних стратегій в напрямі досягнення стійкості в розвитку сонячної енергетики на рівні тераватного масштабу генерації енергії. Також акцентується увага на тому, що якщо не створити системну галузь переробки та не забезпечити зниження втрати ресурсів в процесі переробки відходів, то зростання сонячної енергетики неминуче супроводжуватиметься значними екологічними ризиками, а це прямо суперечить кінцевій цілі розвитку й впровадження даної технології – зменшення негативного впливу на довкілля.

Аналіз результатів останніх досліджень вказує на актуальність вищезначених проблем в сонячній енергетиці. Прогнозовані обсяги утворення відходів ФЕП в контексті їх хіміко-морфологічного складу, наявності цінних та небезпечних компонентів, що є притаманним для категорії ВЕЕО, обумовлюють необхідність системних та сталих рішень в контексті життєвого циклу продукту. З цього виникає необхідність в подальших дослідженнях сировинного потенціалу відпрацьованих ФЕП та відповідних екологічних ризиків.

Методологія дослідження полягає в аналітичному огляді сучасних статистичних звітів, прогнозних матеріалів міжнародних організацій (IRENA, IEA і ін.) та наукових публікацій. Застосовано методи систематизації та порівняльного аналізу: узагальнено дані щодо динаміки встановлення потужностей сонячної енергетики, матеріального складу ФЕП та нормативних практик в різних країнах.

Для кількісного оцінювання масштабів проблеми використані актуальні статистичні дані щодо виробництва та встановлення ФЕП і сценарії прогнозів утворення відходів ФЕП до 2050 року.

Метою дослідження є оцінка та прогнозування утворення відходів ФЕП як складової частини ВЕЕО, визначення основних проблем та ризиків, пов'язаних з накопиченням даних відходів у довкіллі. Об'єкт дослідження – ФЕП як частина ВЕЕО. Предмет дослідження – процеси утворення відходів ФЕП.

Результати дослідження

Конструкція та матеріальний склад ФЕП. Основна маса сучасних ФЕП (≈98%) представляють собою кремнієві кристалічні панелі монокристалічного типу, решта – тонкоплівкові панелі [3]. Проте ще десятиліття тому частки монокристалічних і полікристалічних панелей від загальної кількості кристалічних панелей складала 45% і 55% відповідно [9].

Типова кремнієва панель конструкційно є багатокомпонентною структурою, шари якої міцно спаяні та спресовані в так званий «сендвіч», який складається з таких матеріалів (у % від загальної маси): 76% – скло, яке захищає лицьову частину; 10% – полімерні компоненти (переважно етиленвінілацетат та поліетилентерефталат), які використовуються для ламінування та ізоляції фотоелементів; 8% – алюмінієва рама, що забезпечує механічну жорсткість; 5% – кремнієві фотоелементи; 1% – мідні провідники; < 0,1% припадає на контактні лінії зі срібла (Ag) та припій, що містить олово (Sn) та свинець (Pb) [9]. Таким чином, основними компонентами ФЕП є скло, а також полімери та алюміній, які вважаються нетоксичними. Проте є мала частка матеріалів, таких як свинець та олово, які відносяться до важких металів і є токсичними для живих організмів. Срібло, до того ж, є дорогоцінним металом.

На основі даних про склад ФЕП представимо об'ємну структуру модуля (рис. 3).

Тонкоплівкові ФЕП, на які припадає близько 2% ринку, відрізняються від кристалічного типу панелей більш простою та тоншою конструкцією. Даний тип являє собою тонкий шар фотоелектричного матеріалу у вигляді аморфного кремнію, телурид кадмію (CdTe) та мідь-індій-галій-селенід (CIGS), які нанесені на підкладку – скло, метал чи полімер. Так, наприклад, CdTe панелі

складаються приблизно на 96% зі скла, 3% полімерів (етиленвінілацетат і поліамід), до 1% з напівпровідникового матеріалу (кадмій, телур) та провідників, що містять такі метали, як мідь, свинець, цинк, олово. CIGS панелі складаються на 88-89% зі скла, 7% алюмінію, 4% полімерів (етиленвінілацетат, поліетилентерефталат, силікон) і менш ніж 1% припадає на напівпровідниковий шар (індій, галій, селен, мідь) [9].

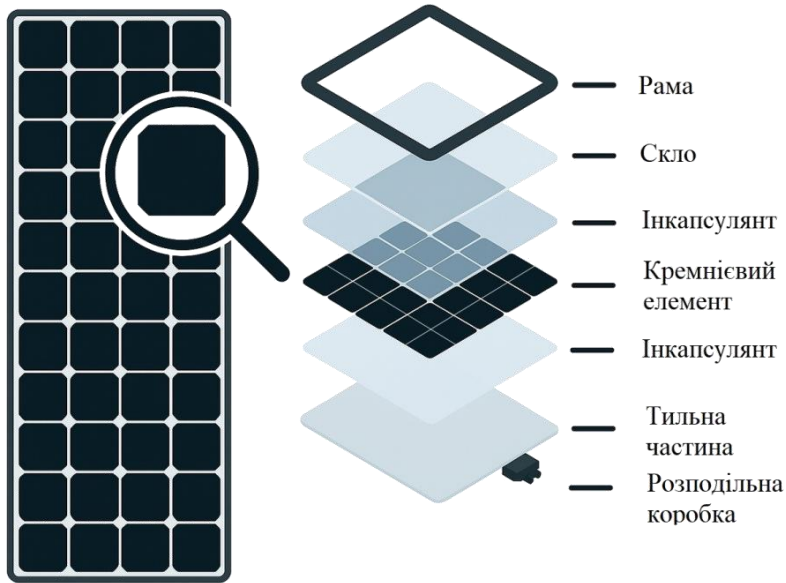


Рис. 3. Схематична структура типової фотоелектричної панелі

Як було зазначено вище, ФЕП є багатокомпонентною структурою, а це ускладнює демонтаж та вилучення матеріалів з відпрацьованих панелей. Приблизно 90% їх маси – це некритичні матеріали, тоді як цінні та потенційно небезпечні компоненти хоча й присутні в малій частці, проте нерозривно інтегровані в саму структуру панелі. Ця особливість панелей обумовлює економічну модель утилізації (низька концентрація цінних металів впливає на рентабельність переробки) та екологічні ризики, які пов'язані з наявністю в складі небезпечних, токсичних навіть у малих кількостях металів, що вимагає розробки спеціалізованих моделей управління даними відходами.

Середній термін експлуатації кремнієвих ФЕП становить орієнтовно 25-30 років, що відповідає гарантійному періоду від виробника, протягом якого зберігається ефективність панелей в межах 70-80% від початкового стану. Деградація фотоелементів є повільним процесом і, в середньому, складає 0,5-0,8% на рік [12, 13]. Попри те, що фактичний термін експлуатації ФЕП може перевищувати 30 років, після цього строку значна частка модулів потребує заміни внаслідок поступового зниження продуктивності, фізичного пошкодження чи морального старіння. Існуюча тенденція до підвищення вихідної потужності модулів сприяє як зростанню їх генеруючого потенціалу, так і ускладнює процеси демонтажу.

Сучасні тенденції у виробництві включають не лише вдосконалення кремнієвих ФЕП, а й розроблення нових типів модулів, в тому числі

перовскітних, які відзначаються нижчою собівартістю, високою ефективністю та гнучкістю, проте наразі є проблеми зі стабільністю, що призводить до передчасного виведення з ладу, та наявністю в складі токсичних сполук свинцю, що ускладнює їх утилізацію. Дослідження свідчать, що наявний у складі таких панелей свинець може легко проникати до ґрунту та рослин, а це створює ризик для довкілля та здоров'я людини. Тому наразі активно досліджуються можливості зменшення такого ризику шляхом зниження передчасної деградації структури таких панелей та ефективних методів їхньої утилізації [14]. Зазначимо, що на сьогодні основна частина ФЕП на ринку не пристосована до легкого розбирання на складові компоненти, а це вимагає розвитку та впровадження відповідних технологій утилізації та знешкодження небезпечних складових.

Аналіз основних факторів утворення відходів ФЕП. У найближчі десятиліття основним джерелом формування відходів ФЕП буде планове виведення з експлуатації великої кількості панелей, що були встановлені на початку та в середині 2000-х років. Після закінчення ≈ 25 -річного періоду експлуатації, ці панелі підлягають заміні, а їх виведення з експлуатації, в свою чергу, призведе до утворення значного потоку відповідних відходів. Очікується, що перші значні об'єми таких відходів від сонячних електростанцій припадуть на 2030-ті роки. Так, за даними Global E-waste Monitor 2024 [8] в 2030 році прогнозується утворення 2,4 млн т, тоді як у 2022 році було утворено 0,6 млн т. Окрім природного старіння, до утворення відходів панелей призводить передчасний вихід з ладу ще до завершення терміну експлуатації. Модулі можуть виходити з ладу через виробничі дефекти і деградацію захисного шару через дію ультрафіолету та вплив підвищеної температури, тобто перегрів самого модуля. До того ж, важливим фактором передчасного виходу з ладу панелей є екстремальні погодні умови. Стихійні явища, як-то град крупного розміру та шквальні пориви вітру (ураган), здатні в короткі строки пошкодити чи призвести до повної руйнації панелей, виводячи з ладу всю генеруючу потужність установок, незалежно від їх технічного стану. Так, у контексті збільшення частоти та інтенсивності екстремальних погодних подій, які обумовлені кліматичними змінами, ймовірність передчасного вибуття з експлуатації ФЕП внаслідок дії природних чинників зростає, що, в свою чергу, також потребує врахування при розробці стратегії управління даними відходами [15, 16].

Додатковим фактором утворення відходів ФЕП є дострокова модернізація сонячних електростанцій. Зростання ефективності та зниження вартості панелей створює економічні стимули для оновлення вже встановлених модулів ще задовго до закінчення їх виробничого ресурсу. При появі на ринку нових панелей з вищою потужністю, заміна старих може бути економічно доцільною. Це особливо актуально за умов постійного зниження вартості панелей. Так, ще в першому прогнозі IRENA [11] за сценарієм «дострокового вибуття» (early-loss scenario), обсяги відходів ФЕП при масовій модернізації сонячних станцій можуть зрости до 78 млн т до 2050 року, що на 30% перевищує обсяги відходів, що утворюються за базового сценарію – 60 млн т. Тож, дострокова заміна панелей, що не використали свого ресурсу, як підвищує ефективність роботи сонячних електростанцій, так і призводить до додаткового утворення відходів ФЕП.

Ризики для довкілля. Зростання обсягів утворення відпрацьованих ФЕП збільшує актуальність проблеми управління відходами як конкретно ФЕП, так і ВЕЕО в цілому. За відсутності системи управління, яка включає інфраструктуру для переробки та нейтралізації небезпечних властивостей таких відходів, їх утворення призводить до ряду екологічних ризиків.

Відпрацьовані ФЕП можуть класифікуватися як небезпечні відходи чи як ВЕЕО, залежно від законодавства країни, в якій вони утворилися. Так, відповідно до Директиви 2012/19/ЄС [17], ФЕП відноситься до 4 категорії електричного та електронного обладнання «Велике обладнання».

Через відсутність системи управління ВЕЕО, відпрацьовані ФЕП можуть надходити на полігони та нелегальні звалища разом з іншими відходами, що призводить до забруднення довкілля небезпечними речовинами. Основним компонентом ФЕП є скло, яке є нейтральним, аморфним матеріалом, що не піддається природному розпаду. Проте, до складу ФЕП входять й такі небезпечні сполуки, як свинець, що присутній у припоях разом з оловом, чи кадмій з телуrom. При цілісній структурі панелі важкі метали не виділяються у довкілля через наявність шару інкапсулянту, який запобігає цьому [18], однак при порушенні цілісності панелей, наприклад, на звалищах, важкі метали можуть вилугувуватися, що створює ризик забруднення ґрунтів та ґрунтових вод. В результаті виникає загроза для живих організмів, в тому числі й для людини, в організм якої важкі метали надходять через трофічні ланцюги. Так, свинець, який є високотоксичним металом, призводить до порушення роботи центральної нервової, кровотворної та серцево-судинної систем. У випадку дітей навіть малі концентрації призводять до порушення когнітивних функцій та зниження інтелектуальних здібностей [19].

Окрім наявності небезпечних компонентів, відходи ФЕП є також джерелом вторинної сировини, яка може бути втрачена в результаті захоронення на полігонах та звалищах, замість відповідної переробки та залучення у виробничі цикли. До складу панелей входить високоякісне скло, алюміній, кремній, мідь, срібло, свинець, олово – це матеріали, які мають потенціал для повторного використання як для виробництва нових ФЕП, так і інших продуктів [9]. Середня маса однієї кремнієвої ФЕП становить приблизно 20 кг [20] і, враховуючи відсоткове співвідношення вмісту матеріалів, виходить, що близько 15,2 кг припадає на скло, 2 кг на полімери (в основному етиленвінілацетат та поліетилентерефталат), 1,6 кг алюмінію, 1 кг кремнію, 0,2 кг міді та 0,002 кг срібла та олова зі свинцем. Такі показники дозволяють не лише оцінити реальний ресурсний потенціал однієї ФЕП, але й екстраполювати це на глобальному рівні (табл. 1).

Зважаючи на це, навіть при відносно невеликій масі окремо взятих компонентів, загальний обсяг утворених відходів ФЕП на рівні сучасного використання панелей створює величезні матеріальні потоки цінних вторинних ресурсів. Також зазначимо, що відсутність переробної інфраструктури призведе до масового захоронення відпрацьованих ФЕП чи їх частин після кустарної переробки, що, враховуючи їхню об'ємність, вимагатиме значних площ на звалищах.

Таблиця 1. Орієнтовна маса компонентів типової кремнієвої фотоелектричної панелі [9]

Компонент	Маса в одній панелі, кг	Маса в 1 тонні панелей, кг
Скло	15,2	760
Полімери (EVA, PET)	2	100
Алюміній	1,6	80
Кремній (фотоелементи)	1	50
Мідь	0,2	10
Срібло та олово, свинець	0,02	1
Всього	20	≈1000

Так, за прогнозами IRENA відповідно до «сценарію 1,5 °C», до 2050 року з відходів ФЕП у результаті переробки можна отримати більше 17,7 млн т вторинної сировини, що еквівалентно 8,8 млрд доларів США [10].

Таким чином, відсутність ефективних механізмів управління відходами ФЕП, як і в цілому ВЕЕО, супроводжується рядом екологічних загроз, серед яких – ймовірність емісії в довкілля небезпечних компонентів, втрата ресурсного потенціалу і залучення територій для захоронення. Сукупність даних факторів свідчить про необхідність впровадження належних підходів до демонтажу та переробки ФЕП.

Фотоелектричні панелі в контексті відходів електричного та електронного обладнання. В цілому, ВЕЕО оцінюються як найбільш динамічно зростаюча категорія відходів у світі. Дані Global E-waste Monitor 2024 [8] свідчать, що у 2022 році обсяг утворених відходів досягнув рівня 62 млн т, що на 83% більше, ніж у 2010 році, коли було утворено 33,8 млн т ВЕЕО. За період 2010-2022 рр. щорічне зростання маси ВЕЕО склало, в середньому, 2,4 млн т [21]. Зростання обсягу утворення даних відходів продовжиться і надалі. Так, відповідно до прогнозів [8, 22, 23], маса ВЕЕО до 2030 року збільшиться до 82 млн т на рік, у 2040 році перевищить 100 млн т, а до 2050 року зросте до 110-120 млн т на рік (рис. 4), що свідчить про експоненціальний характер зростання щорічного утворення ВЕЕО.

Утворення самих відходів ФЕП на сьогодні відбувається дещо повільно відносно ВЕЕО загалом, так як масове встановлення ФЕП почалося досить недавно, а стандартний термін експлуатації панелей складає 25-30 років.

ФЕП, як один із типів ВЕЕО, характеризуються рядом спільних ознак з «класичними» ВЕЕО, в той же час мають конструктивні та функціональні відмінності, що впливає на підходи до їх управління. Спільним є наявність у складі небезпечних, але й водночас ресурсноцінних компонентів, таких як свинець, олово, кадмій, срібло, алюміній, мідь, які доцільно повертати у виробничі цикли. Як і більшість видів побутової електроніки, ФЕП переходять до категорії відходів після закінчення свого терміну експлуатації і вимагають відповідного збору та переробки.

Проблема низького рівня переробки характерна для всіх видів ВЕЕО. Так, за даними [8], в 2022 році з 62 млн т утворених ВЕЕО лише 22,3% було зібрано та перероблено відповідно до встановлених стандартів. Частка ФЕП склала 0,6 млн т від загальної утвореної маси ВЕЕО, з них зібрано та перероблено близько 0,1 млн кг або 17%. Це свідчить, що відходи ФЕП недостатньо охоплені системою управління ВЕЕО.

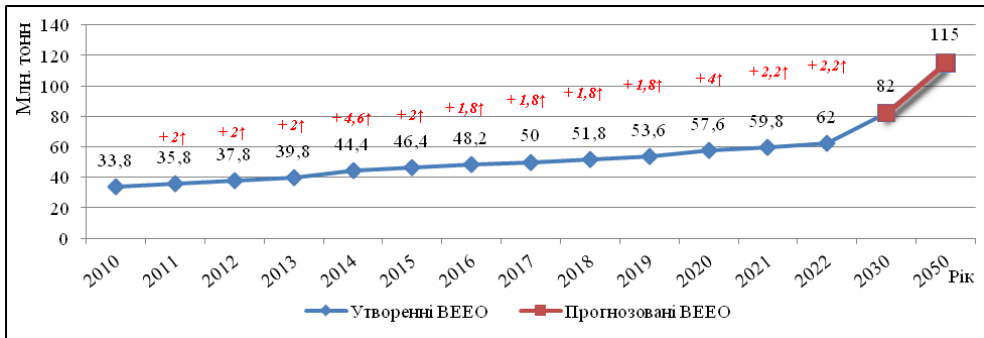


Рис. 4. Динаміка утворення та прогнозування обсягів утворення ВЕЕО за період 2010-2050 роки [21]

Відмінні риси ФЕП від більшості ВЕЕО обумовлені, в першу чергу, їх конструкційними особливостями і матеріальним складом. На відміну від такого обладнання, як смартфони, офісна та побутова техніка, які є своєрідною візитною карткою ВЕЕО і є більш компактними у своїй структурі, містять багато компонентів, як-то друковані плати, дисплей, корпус, провідники і т.д., ФЕП – це великогабаритна конструкція, в складі якої переважає обмежена кількість матеріалів (скло, пластик та алюміній). Це є сприятливим фактором для запровадження технологій з утилізації відходів ФЕП. Так, скло можна переробляти традиційними технологіями, алюмінієві рами переплавляти. Вся складність полягає в розділенні на складові частини та вилученні дрібних, рівномірно розподілених по площі цінних та токсичних металів (срібло, свинець, олово), що є типовим для ВЕЕО. Ключовою особливістю ФЕП є відсутність розбірної конструкції. Навпаки, ФЕП представляють собою герметичні, ламіновані модулі, виготовлені без урахування принципів екодизайну. Шари скла, полімерів та напівпровідникових елементів (рис. 3) склеєні між собою при температурі 150-200 °С [24] та за високого тиску з утворенням цілісної структури, що унеможливує розділення без температурного, хімічного або механічного впливу. Така особливість ФЕП відрізняє від звичайних ВЕЕО, де конструкція в тій чи іншій мірі передбачає можливість повного чи часткового розбирання на складові, що дозволяє відремонтувати чи замінити зламану деталь, тим самим продовжити термін експлуатації обладнання і, як наслідок, сприяти збереженню ресурсів та зменшенню негативного впливу на довкілля відповідно до концепції циркулярної економіки (3.0) [25].

Порівняльний аналіз вторинної сировини з ФЕП та інших ВЕЕО показав, що середня матеріальна цінність однієї тонни відходів ФЕП значно нижча, ніж аналогічна маса друкованих плат чи мобільних телефонів, до складу яких входять різноманітні сполуки та метали, в тому числі дорогоцінні, концентрація та різноманітність яких значно вища. Приміром, у відпрацьованих комп'ютерах та смартфонах середня частка золота складає близько 280 г/т, яке, в основному, зосереджене в платах [22]. У кристалічних ФЕП з дорогоцінних металів є лише срібло, вміст якого менше 0,1%.

Як наслідок, такий морфологічний склад і конструкційна будова ФЕП обумовлюють низьку економічну доцільність переробки, отже, виникає необхідність у впровадженні нормативних і фінансових механізмів

стимулювання утилізації відпрацьованих панелей. На практиці переробка часто зводиться до вилучення алюмінієвої рами для переплавки, подрібнення скла з вилученням якоїсь частки вторинної сировини, а решта відправляється на звалище. Формально, через переважання скла та алюмінію в конструкції, частка вилученої сировини від загальної маси досягає високого значення. До того ж, зменшення вмісту срібла в складі ФЕП знижує економічну вигоду від переробки ФЕП.

Аналіз результатів прогнозування утворення ФЕП. Згідно з першим прогнозом IRENA та IEA-PVPS [9], що був зроблений ще в 2016 році, очікувалося, що за звичайного сценарію, в 2030 році сумарні обсяги відходів ФЕП досягнуть 1,7 млн т та 60 млн т у 2050 році. За даними Глобального моніторингу електронних відходів [8], прогнозується утворення ФЕП на рівні 2,4 млн т.

За сценарію дострокового вибуття, тобто при виході з ладу частини панелей ще до закінчення 30-річного терміну експлуатації, у 2030 році сумарні обсяги відходів ФЕП досягнуть 8 млн т та 78 млн т у 2050 році. Змодельовані щорічні обсяги утворення відходів ФЕП після закінчення терміну експлуатації показують зростаючу тенденцію. Так, наведені дані щодо прогнозування обсягів утворених у 2030 році відходів ФЕП на рівні 0,36 млн т за звичайного сценарію та 1,26 млн т за сценарію дострокового вибуття при встановленні нових 9 млн т ФЕП. У 2040 році такий обсяг становитиме від 2,5 до 3,5 млн т відповідно до звичайного сценарію та передчасного вибуття при встановленні нових 6,5 млн т ФЕП (рис. 5). До 2050 року ситуація набуде ще більш складного характеру. Прогнозується утворення від 5,5 до 6 млн т відходів ФЕП, в залежності від сценарію, при щорічній встановленій масі нових ФЕП у 7 млн т. Таким чином, обсяги утворених відходів складатимуть 80-89% від маси нових встановлених ФЕП. Тобто річний обсяг утворених відходів ФЕП наближається до обсягу встановлених ФЕП.

Прогнозна модель IRENA та IEA-PVPS [9] з сумарним обсягом відходів ФЕП 60-78 млн т у 2050 році розраховувалася на оцінках сумарної встановленої потужності фотоелектричних панелей, яка очікувалася на рівні приблизно 4,5 ТВт у 2050 році. Проте реальний розвиток сонячної енергетики значно випереджає попередні прогнози. Так, у 2024 році сумарна встановлена потужність ФЕП уже досягла 2,3 ТВт [7], а до 2050 року цей показник буде значно більше 4,5 ТВт, відповідно до прогнозу [26] близько 8,5 ТВт. В 2022 році IRENA представила новий прогноз сумарних відходів ФЕП до 2050 року за «сценарієм 1,5 °C» [10], відповідно до якого сумарні обсяги відходів ФЕП у 2030 році складуть близько 4 млн т, а в 2050 році перевищать 200 млн т (рис. 5). Оновлений прогноз свідчить, що очікувальні обсяги відходів ФЕП збільшаться більше ніж у тричі, порівняно з прогнозом 2016 року. Враховуючи, що сучасний розвиток сонячної енергетики значно перевищує попередні прогнози [9] у 4,5 ТВт у 2050 році, прогнозована маса сукупних відходів ФЕП у понад 200 млн т (рис. 5) виглядає більш реалістичною.

Отримані результати дають змогу краще зрозуміти роль ФЕП у формуванні ВЕЕО. Аналіз показує, що наразі частка відходів ФЕП у ВЕЕО невелика, однак можна стверджувати, що в майбутньому ситуація значно зміниться. Про це свідчить переорієнтація енергетичного сектору від традиційної енергетики на ВДЕ, зокрема, на сонячну енергетику, що підтверджується постійним ростом інвестицій як в дослідження, так і впровадження сонячної енергетики.

Прогнози IRENA та IEA-PVPS [9] про те, що до 2030 року сукупний обсяг відходів ФЕП досягне 8 млн т і до 200 млн т у 2050 році, тільки підтверджують це. Таким чином, частка ФЕП у складі ВЕЕО дуже швидко збільшиться, перетворившись з незначної на одну з основних складових частин ВЕЕО.

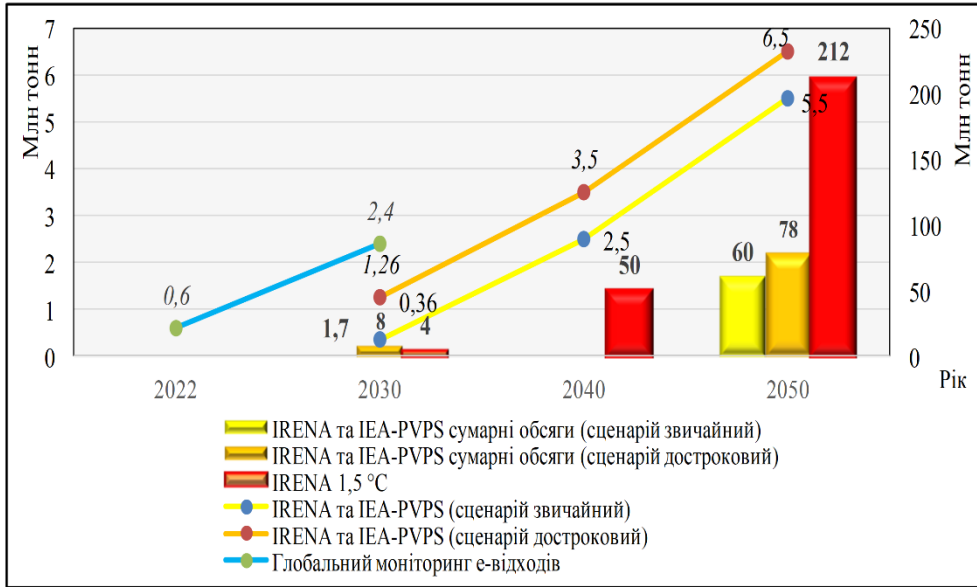


Рис. 5. Прогнозування обсягів утворення відходів ФЕП до 2050 року за різними моделями [8, 9, 10]

Підходи до управління відходами ФЕП знаходяться на стадії розробки. Ще у 2012 році Європейський Союз, відповідно до Директиви 2012/19/ЄС [17], запровадив принцип розширеної відповідальності виробника (РВВ), який зобов'язує виробників та імпортерів ФЕП фінансувати збір та переробку відпрацьованих ФЕП у Європейському Союзі. Проте, через тривалий життєвий цикл ФЕП, незначні обсяги утворення відходів ФЕП та оцінювання їх утворення сукупно для всієї категорії «Велике обладнання» ВЕЕО, відсутня статистична інформація з оцінки ефективності запровадження РВВ [27].

Однак у більшості країн ФЕП не відносяться до категорії ВЕЕО. Так, наприклад, в деяких штатах США ФЕП класифіковані як «універсальні відходи» з метою спрощення методів регулювання. Також відпрацьовані ФЕП можуть підпадати під категорію «небезпечні відходи» через наявність в складі свинцю та кадмію, але все залежить від концентрації [28].

Отже, перепонами до запровадження ефективної системи управління відходами ФЕП в контексті циркулярної економіки виступає ряд чинників, серед яких найбільш вагомими є економічні. Переробка панелей потребує витрат, які часто не окупуються через складність структури і низький вміст цінних компонентів. Не налагоджений централізований збір відпрацьованих панелей. Також важливу роль відіграють обсяги утворення відходів, які лише набирають обертів. Однак наявна інфраструктура без відповідного розвитку буде не спроможна до належного управління майбутніми обсягами відходів ФЕП, які будуть стрімко зростати.

Узагальнимо, що удосконалення управління відходами ФЕП включає наступні пункти: запровадження екологічного дизайну – проектування панелей з урахуванням можливості переробки, за рахунок зменшення/використання безпечних компонентів та спрощення конструкції; стандартизація демонтажу та переробки панелей; розробка та впровадження регуляторної системи щодо управління відходами ФЕП.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Результати проведених досліджень обсягів утворення відходів ФЕП показали, що наразі абсолютні та відносні обсяги таких відходів у складі групи ВЕЕО незначні. Проте з 2030 року прогнозується стрімке зростання: з 0,6 млн т у 2022 році до 5,5-6,5 млн т у 2050 році. Очікується накопичення відходів ФЕП на рівні 212 млн т у 2050 році. Факторами, які обумовлюють таку ситуацію, є розвиток ВДЕ і сонячної енергетики зокрема, завершення планового строку експлуатації першого масового запуску панелей у 2000-х роках, акцент на економічну ефективність панелей тощо.

Відходи ФЕП становлять значні екологічні ризики для довкілля через наявність токсичних компонентів та низький рівень утилізації панелей (17%). Останній фактор обумовлений складністю багатокomпонентної конструкції панелей, що ускладнює процес декомпозиції та підвищує вартість отриманої вторинної сировини. Цінні компоненти з відходів ФЕП мають чи не найнижчу собівартість серед інших ВЕЕО. Через відсутність належної системи управління ВЕЕО та прозорих механізмів запровадження РВВ, основна частина відходів ФЕП не переробляється, а відправляється на складування чи захоронення на звалищах. Без запровадження ефективної системи управління такими відходами очікується посилення негативних ефектів для довкілля через загрозу значних обсягів утворення таких відходів в найближчі роки.

Виходячи з цього, постає питання в необхідності впровадження системного та еколого-економічного підходу до управління відходами ФЕП. Якщо заходи з впровадження будуть відкладатися, то в наступні десятиліття відновлювальна енергетика спричинить парадокс – технологія, що впроваджувалася для зменшення негативного впливу на довкілля, стане джерелом забруднення довкілля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. IRENA. (2024). World energy transitions outlook 2024: 1.5°C pathway. International Renewable Energy Agency. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2024.pdf
2. REN21. (2024). Renewables 2024 global status report collection: Global overview. REN21 Secretariat. URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf
3. de l'Epine, M., & Kaizuka, I. (2024). Trends in Photovoltaic Applications 2024. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. <https://doi.org/10.69766/jnew6916>
4. Annual solar module production worldwide 2023| Statista. (2024). Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/668764/annual-solar-module-manufacturing-globally/>
5. Regional distribution of solar module production | Statista. (2024). Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/668749/regional-distribution-of-solar-pv-module-manufacturing/>

6. Existing capacity of solar PV worldwide by select country 2023| Statista. (2025). Statista. URL: <https://www.statista.com/statistics/264629/existing-solar-pv-capacity-worldwide/>
7. Masson, G., Van Rechem, A., de l'Epine, M., & Jäger-Waldau, A. (2025). Snapshot of Global PV Markets 2025. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. <https://doi.org/10.69766/pbhv9141>
8. Baldé, C., Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., Angelo, E., Althaf, S., Bel, G., Deubzer, O., Fernandez-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., & Khetriwal, D. (2024). The global e-waste monitor 2024. URL: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/03/GEM_2024_18-03_web_page_per_page_web.pdf
9. Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. A. (2016). End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). <https://doi.org/10.2172/1561525>
10. IRENA. (2022). World energy transitions outlook 2022: 1.5°C pathway. International Renewable Energy Agency. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf
11. Mirletz, H., Ovaitt, S., Sridhar, S., & Barnes, T. M. (2024). Prioritizing circular economy strategies for sustainable PV deployment at the TW scale. *EPJ Photovoltaics*, 15, 18. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2024015>
12. Solar Energy Technologies Office Photovoltaics End-of-Life Action Plan. (2022). Office of Scientific and Technical Information (OSTI). URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-03/Solar-Energy-Technologies-Office-PV-End-of-Life-Action-Plan.pdf>
13. Deline, C., Jordan, D., Sekulic, B., Parker, J., Mcdanold, B., & Anderberg, A. (2022). PV Lifetime Project - 2021 NREL Annual Report. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81172.pdf>
14. Suo, J., Pettersson, H., & Yang, B. (2025). Sustainable Approaches to Address Lead Toxicity in Halide Perovskite Solar Cells: A Review of Lead Encapsulation and Recycling Solutions. *EcoMat*, 7(1). <https://doi.org/10.1002/eom2.12511>
15. Jordan, D. C., Perry, K., White, R., & Deline, C. (2023). Extreme Weather and PV Performance. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/jphotov.2023.3304357>
16. Ali, H. B., Kamran, M. A., Gul, R. M., Yasir, M., Alabdullah, F. T., Usman, C., & Tariq, A. (2024). Mechanical integrity of photovoltaic panels under hailstorms: Mono vs. poly-crystalline comparison. *Heliyon*, 10(4), e25865. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25865>
17. European Parliament & Council of the European Union. (2012). Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). EUR-Lex. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:32012L0019>
18. Solar Panel Frequent Questions | US EPA. (2024). US EPA. URL: <https://www.epa.gov/hw/solar-panel-frequent-questions>
19. Kim, H.-C., Jang, T.-W., Chae, H.-J., Choi, W.-J., Ha, M.-N., Ye, B.-J., Kim, B.-G., Jeon, M.-J., Kim, S.-Y., & Hong, Y.-S. (2015). Evaluation and management of lead exposure. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 27(1). <https://doi.org/10.1186/s40557-015-0085-9>
20. AL-Zoubi, O. H., Shawaqfah, M., Almomani, F., Damash, R. A., & Al-Zboon, K. (2022). Photovoltaic Solar Cells and Panels Waste in Jordan: Figures, Facts, and Concerns. *Sustainability*, 14(20), 13313. <https://doi.org/10.3390/su142013313>
21. Buchka, A. (2024). Classification of waste electrical and electronic equipment by ecological hazard. [Бучка, А. (2024). Класифікація відходів електричного та електронного обладнання за ознакою екологічної небезпеки]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337(3(2)), 265–272. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-40> (in Ukrainian).

22. Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam. URL: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf.
23. Coalition, E. W. (2019). A new circular vision for electronics: time for a global reboot. World Economic Forum. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf
24. Oliveira, M. C. C. d., Diniz Cardoso, A. S. A., Viana, M. M., & Lins, V. d. F. C. (2018). The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2299–2317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.039>.
25. Reike, D., Vermeulen, W. J. V., & Witjes, S. (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 246–264. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>.
26. Asmelash, E., & Prakash, G. (2019). Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 1-73. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf
27. New weee forum paper: Issues with PV panels & compliance with EPR legislation. WEEE Forum. (2021). URL: https://weee-forum.org/ws_news/weee-forum-releases-pv-paper/
28. End-of-Life Solar Panels: Regulations and Management | US EPA. (2025). US EPA. URL: <https://www.epa.gov/hw/end-life-solar-panels-regulations-and-management#:~:text=Some%20states%20have%20enacted%20laws,,impacting%20solar%20panel%20waste,%20including>

Стаття надійшла до редакції 05.12.25, надійшла після рецензування 27.01.26, прийнята 03.03.26

The article was received 05.12.25, received after revision 27.01.26, accepted 03.03.26

Бучка Андрій Володимирович

аспірант 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/0000-0003-1447-9027> **e-mail:** andriibuchka@gmail.com

Приходько Вероніка Юрївна

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

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

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

УДК 628.4:620.9

V.V. Filin¹

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-0745-6181> **e-mail:** volodymyr_filin@ukr.net

O.A. Ulytsky², Doctor of Geological Sciences, Professor, Leading Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2674-2208> **e-mail:** olegulytsky@gmail.com

V.F. Frolov³, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Applied Ecology and Environmental Management

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1675-8476> **e-mail:** frolov19470308@ukr.net

¹State Scientific Institution “Institute of Ecological Restoration and Development of Ukraine”, Kyiv, Ukraine

²State Institution “Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine”, Kyiv, Ukraine

³Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Kyiv, Ukraine

INNOVATIVE MVP PRODUCT OF THE E-WASTE PLATFORM ON THE UKRAINIAN MARKET

Abstract. *The article presents the development and key features of an innovative Minimum Viable Product (MVP) of the E-Waste digital platform designed to enable fast and efficient communication between waste generators and waste-management operators. The MVP requires the use of modern software-engineering approaches and geoinformation technologies to address environmental challenges at local and regional levels. The solution had no analogues on the Ukrainian market at the time of its creation and is aligned with EU waste legislation, the National Waste Management Strategy of Ukraine until 2030, and contemporary trends in digitalization and transparent decision-making for environmental safety.*

The E-Waste platform aims to enhance efficiency in waste management, support monitoring of illegal dumping and uncontrolled disposal, and foster the transition towards a sustainable circular economy based on ESG principles. Integration with Geographic Information Systems (GIS) enables mapping of waste locations and licensed operators, while an analytical module supports governmental and municipal bodies in tracking waste flows. The platform's architecture combines process automation, secure data exchange, and counterparty verification in a unified information environment.

The socio-economic impact includes stimulation of small and medium-sized enterprises in the environmental services sector, raising public awareness regarding proper waste management, and supporting Ukraine's implementation of international environmental obligations and EU directives. The E-Waste platform is considered a promising tool that can underpin further improvement of waste-management infrastructure, regional scaling, and the integration of advanced technologies (such as blockchain) to ensure operational transparency.

Keywords: *E-Waste, waste management, digital platforms, circular economy, environmental innovations, data transparency, GIS analytics, environmental marketplace.*

В.В. Філін¹, О.А. Улицький², В.Ф. Фролов³

¹Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», м. Київ, Україна

²ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», м. Київ, Україна

³Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Київ, Україна

ІННОВАЦІЙНИЙ MVP-ПРОДУКТ ПЛАТФОРМИ E-WASTE НА РИНКУ УКРАЇНИ

***Анотація.** Стаття висвітлює створення та функціональні особливості інноваційного MVP (Minimum Viable Product) цифрової платформи E-Waste, призначеної для оперативної комунікації між утворювачами відходів та суб'єктами господарювання у сфері управління відходами. Показано, що розробка не має аналогів на українському ринку на момент створення, відповідає вимогам Директиви 2008/98/ЄС та Національної стратегії управління відходами до 2030 року, а також сучасним трендам цифровізації й прозорості управлінських рішень.*

Платформа E-Waste спрямована на підвищення ефективності управління відходами, контроль несанкціонованих і незаконних звалищ, а також підтримку розвитку циркулярної економіки на основі ESG-підходу. Інтеграція з геоінформаційними системами (GIS) забезпечує відображення локацій відходів і найближчих операторів, а аналітичний модуль створює можливості для моніторингу потоків відходів органами державної та муніципальної влади. Архітектура MVP враховує автоматизацію процесів, захищений обмін даними та верифікацію контрагентів в єдиному інформаційному середовищі.

Соціально-економічний ефект полягає у стимулюванні розвитку малого та середнього бізнесу у сфері еколого-орієнтованих послуг, підвищенні обізнаності щодо належного управління відходами та сприянні виконанню Україною міжнародних екологічних зобов'язань і директив ЄС. Платформа розглядається як базовий інструмент для подальшого вдосконалення інфраструктури управління відходами, її масштабування та інтеграції новітніх технологій (зокрема блокчейн) для підвищення прозорості операцій.

***Ключові слова:** E-Waste, управління відходами, цифрові платформи, циркулярна економіка, екологічні інновації, прозорість даних, GIS-аналітика, екологічний маркетинг.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.45-53>

Вступ

Екологічна політика України орієнтована на перехід до циркулярної економіки та цифровізації управління відходами відповідно до Директиви 2008/98/ЄС та Національної стратегії управління відходами до 2030 року. Однак комунікація між утворювачами відходів, операторами з їх оброблення й органами влади залишається фрагментованою, що ускладнює контроль потоків відходів і створює додаткові ризики для довкілля.

За умов розвитку цифрових технологій особливо актуальним є створення інтегрованих онлайн-рішень, які об'єднують учасників ринку в єдиному інформаційному середовищі, забезпечують оперативний обмін даними, верифікацію контрагентів та аналітичну підтримку управлінських рішень.

У цьому контексті розроблення MVP платформи E-Waste є першим в Україні прикладом цифрового інструменту, що поєднує функції екологічного маркетплейсу, геоінформаційного сервісу та аналітичної системи для органів влади.

Об'єктом дослідження є процес цифровізації системи управління відходами в Україні, а предметом – MVP-платформа E-Waste як інструмент оптимізації комунікації між учасниками ринку екологічних послуг.

Аналіз досліджень та постановка задачі

Сучасний стан управління відходами в Україні характеризується низьким рівнем цифровізації, відсутністю єдиних електронних реєстрів та інтегрованих каналів взаємодії між утворювачами відходів та операторами ринку управління відходами. Локальні бази даних і паперові звіти не забезпечують своєчасний моніторинг потоків відходів та контроль дотримання екологічних вимог.

З позицій інженерії програмного забезпечення необхідним є створення гнучкої платформи з модульною архітектурою, яка дозволить:

- масштабувати функціонал;
- інтегрувати геоінформаційні сервіси;
- підключати аналітичні модулі та можливі фінансові/токенізовані механізми;
- забезпечити інформаційну безпеку та захист персональних даних.

Інтеграція з GIS є ключовим інноваційним компонентом, що дозволяє просторово відображати точки утворення відходів, шляхи їх переміщення та розташування ліцензованих операторів. Автоматизована перевірка контрагентів через державні реєстри підвищує довіру між учасниками ринку та зменшує ризики тіньових операцій.

Таким чином, завданням дослідження є обґрунтування та реалізація MVP-платформи E-Waste, яка поєднує технологічну інноваційність, практичну екологічну користь і потенціал трансформації сектора управління відходами на національному рівні.

Мета роботи

Метою роботи є наукове обґрунтування, розроблення та апробація MVP-рішення платформи E-Waste як цифрового інструменту інтеграції екологічних, технологічних та управлінських процесів у сфері управління відходами.

Запропонована інновація дозволяє:

- ✓ створити єдине інформаційне середовище для оперативної комунікації між утворювачами відходів, операторами та органами влади;
- ✓ автоматизувати пошук і підбір контрагентів;
- ✓ зменшити часові й фінансові витрати на організацію екологічних послуг;
- ✓ формувати достовірну базу даних про потоки відходів;
- ✓ підвищити прозорість та контроль за переміщенням відходів;
- ✓ підтримати впровадження принципів циркулярної економіки та еквівалентність вимогам ЄС.

З технічної точки зору мета включає створення масштабованої модульної архітектури з можливістю інтеграції з GIS, державними реєстрами, аналітичними модулями та потенційно – блокчейн-технологіями.

Методика досліджень

Методика дослідження базується на поєднанні системного, аналітичного та інженерно-технологічного підходів і включає такі етапи:

1. **Огляд і порівняльний аналіз** цифрових рішень у сфері управління відходами в Україні та ЄС (електронні реєстри, маркетплейси, системи відстеження потоків відходів). Визначено функціональні прогалини та сформовано вимоги до MVP.

2. **Проектування архітектури MVP** із застосуванням методів програмної інженерії:

- моделювання користувацьких сценаріїв (use cases);

- побудова інформаційної моделі бази даних з урахуванням Національного класифікатора відходів;

- UX/UI-дизайн, орієнтований на зручність та інтуїтивність;

- використання Agile-підходу та DevOps-циклу для поетапного вдосконалення продукту.

3. **Аналітичне моделювання ефективності** роботи платформи: оцінка часу обробки запитів, стабільності роботи модулів, рівня захисту даних та очікуваного екологічного й соціального ефекту (скорочення несанкціонованих та зменшення нелегальних звалищ, зростання кількості верифікованих транзакцій).

4. **Застосування GIS-інструментів** для картографування локацій утворення відходів, маршрутів їх переміщення та прив'язки контрагентів до конкретної території.

5. **UX/UI-аналіз прототипу**: оцінка логіки інтерфейсу, навігації, адаптивності дизайну та зручності для різних груп користувачів.

Такий комплексний підхід дозволяє оцінити MVP-платформу E-Waste як інструмент цифрової трансформації у сфері управління відходами.

Основні результати дослідження

У результаті дослідження створено інноваційний прототип платформи E-Waste – MVP цифрової системи комунікації між утворювачами відходів, операторами та органами влади. Розроблена архітектура забезпечує:

- швидкий пошук і підбір контрагентів у режимі реального часу;

- класифікацію відходів за національними стандартами;

- просторову візуалізацію локацій відходів і найближчих ліцензованих операторів (GIS-блок);

- захищений обмін даними та верифікацію учасників через інтеграцію з державними реєстрами;

- аналітичну підтримку органів влади щодо моніторингу потоків відходів.

Проведений UX/UI-аналіз підтвердив інтуїтивність інтерфейсу, логічну структуру та готовність до подальшого масштабування. Серед напрямів удосконалення – розширення довідкового блоку, адаптація інтерфейсу для мобільних пристроїв та оптимізація картографічного відображення.

З точки зору соціально-економічного ефекту, впровадження MVP-платформи E-Waste сприяє:

- скороченню часу та витрат на пошук операторів;
- зменшенню несанкціонованих викидів та нелегальних звалищ;
- підтримці розвитку МСП у сфері екологічних послуг;
- гармонізації практик управління відходами з вимогами ЄС та міжнародними зобов'язаннями України.

Оглядовий опис платформи E-Waste

Створений MVP-прототип E-Waste є першим в Україні рішенням такого типу та поєднує:

1. Унікальність рішення:

- інтеграція функцій екологічного маркетингу, GIS та аналітики;
- автоматизована класифікація відходів;
- перевірка учасників у єдиному інформаційному середовищі.

2. Практичну користь:

- зменшення транзакційних витрат учасників ринку;
- створення додаткових прозорих умов для укладання угод;
- сприяння повторному використанню ресурсів та циркулярній економіці.

3. Інноваційні компоненти:

- інтеграція з GIS для відображення локацій відходів та операторів;
- модуль накопичення даних для аналітики та планування на рівні регіонів.

4. Соціально-економічний ефект:

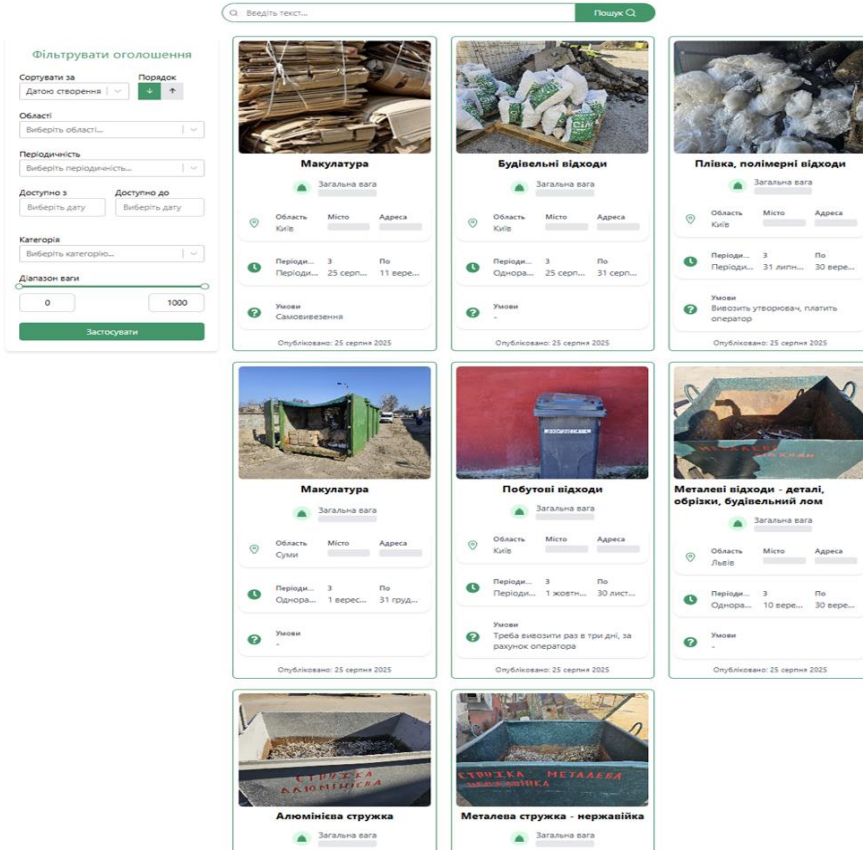
- нові можливості для малого й середнього бізнесу;
- підвищення екологічної свідомості;
- підтримка виконання європейських екологічних вимог.

Опис інтерфейсу та архітектури

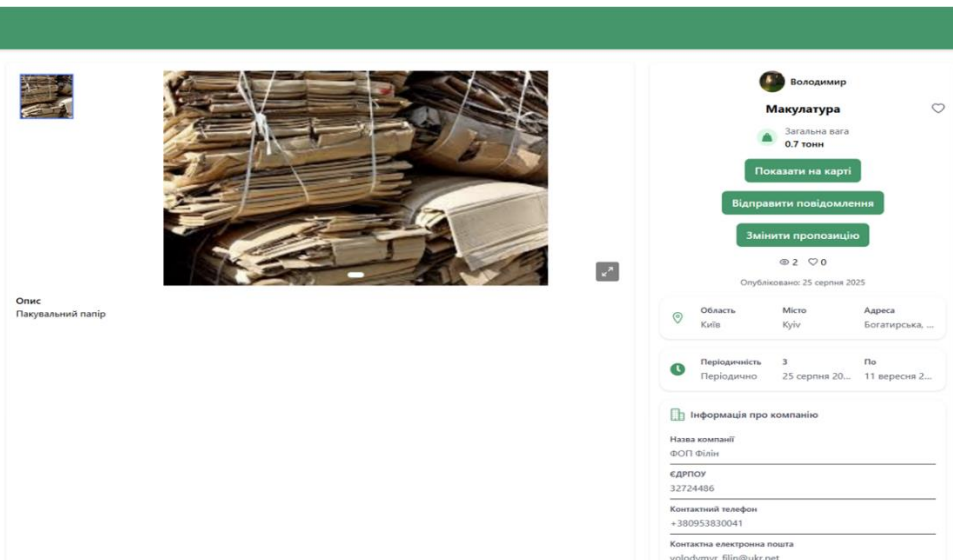
Інтерфейс платформи реалізований українською мовою з можливістю додавання англійської версії. Основні елементи:

- верхня панель навігації (логотип, новий пост, чати, профіль, перемикач мови);
- ліва панель фільтрів (тип відходів, регіон, період, маса, умови передачі);
- центральний список оголошень (фото, назва відходів, вага, локація, період доступності);
- сторінка оголошення з розширеною інформацією (опис, карта, дані про компанію, пропозиції).

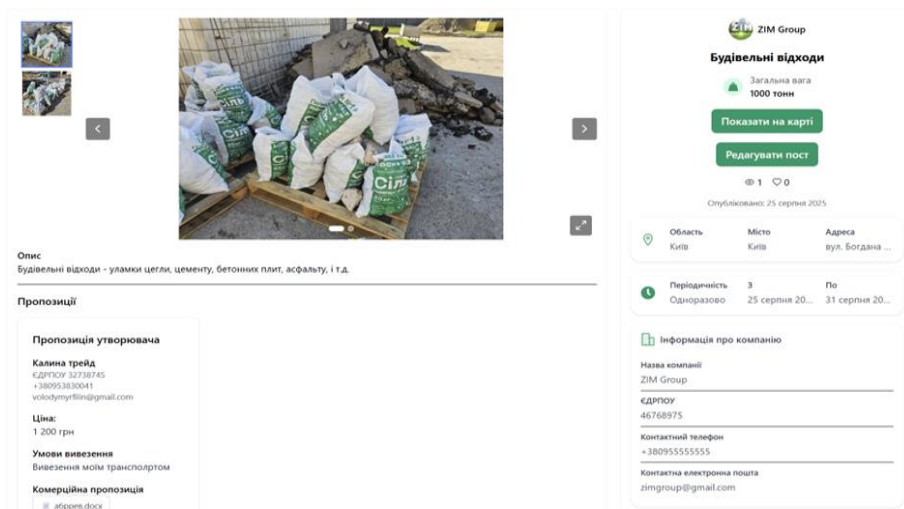
Особливістю архітектури є використання механізму «інформаційних токенів» для доступу до розширених даних про відходи і контрагентів, що створює додатковий рівень комерційної мотивації та контролю за якістю інформації. Передбачена можливість надсилання й отримання пропозицій, а також відбору найкращих умов співпраці утворювачем відходів.



Зображення 1. Головна сторінка інтерфейсу платформи E-Waste (зразок)



Зображення 2. Сторінка відображення розширеної/повної інформації про відхід після придбання токена на платформі E-Waste



Зображення 3. Сторінка оголошення та отримання пропозицій користувача – утворювача відходів

Висновки

1. Розроблена MVP-платформа E-Waste є інноваційним цифровим інструментом, що поєднує функціонал маркетплейсу, GIS-сервісів та аналітичних модулів для учасників ринку управління відходами.

2. Архітектура платформи забезпечує масштабованість, інтеграцію з державними реєстрами та потенціал впровадження блокчейн-технологій, що відповідає сучасним вимогам цифрової трансформації та екологічного управління.

3. Впровадження E-Waste сприяє зменшенню несанкціонованих викидів, розвитку циркулярної економіки, підвищенню прозорості ринку екологічних послуг і виконанню Україною міжнародних екологічних зобов'язань.

4. Подальший розвиток платформи пов'язаний із розширенням географії застосування, інтеграцією з національною системою електронного моніторингу відходів, створенням мобільного застосунку та поглибленням аналітичних можливостей для державних і муніципальних органів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Улицький, О. А., & Філін, В. В. (2024). Науковий підхід у створенні та впровадженні програмного забезпечення у сфері управління відходами як допоміжний прикладний інструмент у процесі імплементації нормативно-правових актів Європейського Союзу. У *Матеріали міжнародної науково-теоретичної та прикладної конференції «Відновлення екосистем, які постраждали внаслідок воєнних дій: українські та європейські виклики (REDMO-2024)»* (с. 193–195). Київ: Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління.
- Відновлення екосистем, які постраждали внаслідок воєнних дій: українські та європейські виклики (REDMO-2024). (2024). Матеріали міжнародної науково-теоретичної та прикладної конференції.
- Філін, В. В., & Улицький, О. А. (2025). Геоінтеграція: наука, технології та довкілля. У *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції для студентів, аспірантів та молодих учених*. Київ: Інститут екологічного відновлення та розвитку України.

4. Європейський Парламент & Рада Європейського Союзу. (2008). Директива 2008/98/ЄС про відходи та скасування певних директив. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text
5. European Commission. (n.d.). *EU taxonomy for sustainable activities*. https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en
6. European Commission. (2023). Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2486 of 27 June 2023 supplementing Regulation (EU) 2020/852... <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R2486>
7. Верховна Рада України. (2022). Закон України «Про управління відходами». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
8. Кабінет Міністрів України. (2017). Розпорядження «Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-p#Text>

Стаття надійшла до редакції 16.01.26, надійшла після рецензування 26.02.26, прийнята 04.03.26

REFERENCES

1. Ulytskyi, O. A., & Filin, V. V. (2024). Naukovyi pidkhid u stvorenni ta vprovadzhenni prohramnoho zabezpechennia u sferi upravlinnia vidkhodamy yak dopomizhnyi prykladnyi instrument u protsesi implementatsii normatyvno-pravovykh aktiv Yevropeiskoho Soiuзу [A scientific approach to the development and implementation of software in waste management as an auxiliary applied tool in the process of implementing European Union legal acts]. In *Proceedings of the International scientific-theoretical and applied conference “Restoration of ecosystems affected by military actions: Ukrainian and European challenges (REDMO-2024)”* (pp. 193–195). Kyiv: State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management. [in Ukrainian]
2. *Restoration of ecosystems affected by military actions: Ukrainian and European challenges (REDMO-2024)*. (2024). Proceedings of the International scientific-theoretical and applied conference.
3. Filin, V. V., & Ulytskyi, O. A. (2025). Heointehratsiia: nauka, tekhnolohii ta dovkillia [Geointegration: science, technologies and environment]. In *Proceedings of the All-Ukrainian scientific and practical conference for students, postgraduate students and young scientists*. Kyiv: Institute of Environmental Restoration and Development of Ukraine. [in Ukrainian]
4. European Parliament & Council of the European Union. (2008). Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text
5. European Commission. (n.d.). *EU taxonomy for sustainable activities*. https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en
6. European Commission. (2023). Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2486 of 27 June 2023 supplementing Regulation (EU) 2020/852... <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R2486>
7. Verkhovna Rada of Ukraine. (2022). Law of Ukraine “On waste management”. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
8. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2017). Order “On approval of the National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030”. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-p#Text>

The article was received 16.01.26, received after revision 26.02.26, accepted 04.03.26

Філін В.В.

Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
Адреса робоча: вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, м. Київ, 03035, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-0745-6181> **e-mail:** volodymyr_filin@ukr.net

Улицький О.А.

д.геол.н., професор, провідний науковий співробітник, ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»

Адреса робоча: просп. Академіка Палладіна, 34-А, м. Київ, 03142, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2674-2208> **e-mail:** olegulytsky@gmail.com

Фролов В.Ф.

д.т.н., доцент, професор кафедри прикладної екології та природокористування Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Адреса робоча: проспект Віталія Грицаєнка, 24, м. Полтава, 36011, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1675-8476> **e-mail:** frolov19470308@ukr.net

УДК 504.054

Evgeniy Grechanyuk, Postgraduate student of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5687-2269>

Vitalii Ishchenko, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-1096>

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

SUBSTITUTION OF METHODS FOR MANAGEMENT OF POLYMER COMPONENTS OF WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Abstract. *The analytical review is aimed at an expanded study of modern concepts and practical solutions for the management of polymer components of waste electrical and electronic equipment (WEEE), which form rapidly growing technogenic flows and are characterized by increased material and technological complexity. Polymer fractions in WEEE are characterized by low suitability for reuse due to their multicomponent composition, the presence of toxic functional additives, heterogeneous morphology and difficulties in separation from metal, ceramic and composite elements, which exacerbates the problem of transfer of persistent organic pollutants, halogen-containing compounds and thermal degradation products into the environment. Within the framework of the research analysis, infrastructure schemes for the collection and primary treatment of WEEE, including municipal logistics hubs, stationary and mobile collection points, deposit-return mechanisms and extended producer responsibility instruments, were considered, with an assessment of their effectiveness and key limitations. Considerable attention is paid to high-tech solutions, including optical identification systems, robotic dismantling modules, digital trajectory platforms for tracking material flows, intelligent container complexes and sensor Smart Bins. The engineering practices of leading world companies that implement closed polymer cycles, use automated reverse logistics chains and ensure a high level of selective extraction of material fractions are analyzed. The experience of European WEEE pre-processing centers that operate in accordance with EU regulatory standards and demonstrate effective models of selective preparation of polymers for further use is highlighted. Based on the generalized results, a set of scientifically based recommendations has been formed to improve the efficiency of WEEE polymer component management, which involves the integration of innovative technologies, regulatory practices and circular economy principles to minimize environmental risks and improve the resource cycle.*

Keywords: *polymer components, waste recycling, circular economy, automated sorting, reverse logistics, waste collection optimization.*

© С. Гречанюк, В. Іщенко, 2026

Є. Гречанюк, В. Іщенко

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБІВ УПРАВЛІННЯ ПОЛІМЕРНИМИ КОМПОНЕНТАМИ ВІДХОДІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ

***Анотація.** Аналітичний огляд спрямований на розширене вивчення сучасних концепцій і практичних рішень щодо управління полімерними складниками відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО), які формують швидкозростаючі техногенні потоки та характеризуються підвищеною матеріальною й технологічною складністю. Полімерні фракції у ВЕЕО вирізняються низькою придатністю до повторного використання через багатокомпонентний склад, наявність токсичних функціональних добавок, різномірність морфології та труднощі відокремлення від металевих, керамічних і композиційних елементів, що загострює проблему перенесення у довкілля стійких органічних забруднювачів, галогеновмісних сполук і продуктів термічного руйнування. У межах дослідницького аналізу розглянуто інфраструктурні схеми збирання та первинної обробки ВЕЕО, що включають муніципальні логістичні вузли, стаціонарні й мобільні пункти приймання, депозитно-поворотні механізми та інструменти розширеної відповідальності виробника з оцінкою їх результативності та ключових обмежень. Значну увагу приділено високотехнологічним рішенням, серед яких оптичні ідентифікаційні системи, роботизовані модулі демонтажу, цифрові траєкторні платформи відстеження матеріальних потоків, інтелектуальні контейнерні комплекси та сенсорні Smart Bins. Проаналізовано інженерні практики провідних світових компаній, що впроваджують замкнуті полімерні цикли, використовують автоматизовані ланцюги зворотної логістики та забезпечують високий рівень селективного вилучення матеріальних фракцій. Висвітлено досвід європейських центрів попереднього оброблення ВЕЕО, які діють відповідно до регуляторних норм ЄС та демонструють ефективні моделі селективної підготовки полімерів до подальшого використання. На основі узагальнених результатів сформовано комплекс науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення ефективності управління полімерними компонентами ВЕЕО, який передбачає інтеграцію інноваційних технологій, регуляторних практик та принципів циркулярної економіки для мінімізації екологічних ризиків і вдосконалення ресурсного циклу.*

***Ключові слова:** полімерні компоненти, переробка відходів, циркулярна економіка, автоматизоване сортування, зворотна логістика, оптимізація збору відходів.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.54-68>

Вступ

Управління відходами електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності. Згідно з даними Глобального моніторингу електронних відходів [27], у 2019 році в усьому світі було утворено 53,6 мільйона тонн електронних відходів, і цей показник продовжує зростати з середньорічним темпом у 3-4%.

Полімерні компоненти, які становлять значну частину ВЕЕО, є особливо складними для переробки через їхню різноманітність, наявність токсичних добавок та технологічні обмеження [3]. Наприклад, у складі електронних відходів часто зустрічаються такі пластики, як акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полістирол (PS), полікарбонат (PC) та поліпропілен (PP), кожен з яких вимагає специфічних методів переробки.

Ефективне управління полімерними компонентами ВЕЕО має вирішальне значення для зменшення екологічного впливу та реалізації принципів циркулярної економіки. Згідно з дослідженнями [27], лише 17,4% електронних відходів у світі було зібрано та перероблено у 2019 році, що підкреслює необхідність вдосконалення систем збору, сортування та переробки. Полімерні відходи, які не піддаються правильній утилізації, часто потрапляють на звалища, де вони можуть виділяти токсичні речовини, такі як діоксини та фурани, що становить серйозну загрозу для здоров'я людей та навколишнього середовища [5].

Однією з ключових проблем у переробці полімерних компонентів ВЕЕО є їхнє відділення від інших матеріалів, таких як метали, скло та кераміка. Наприклад, у складі електронних пристроїв часто зустрічаються композитні матеріали, які ускладнюють процес сортування. Згідно з дослідженнями [5], наявність домішок у полімерних відходах може знизити їхню придатність для вторинного використання на 50-70%. Тому розробка ефективних методів відділення полімерних компонентів є критично важливою для підвищення якості переробки та зменшення обсягів відходів, що потрапляють на звалища.

Крім того, зростання обсягів електронних відходів супроводжується збільшенням кількості токсичних речовин, які містяться в полімерних компонентах. Наприклад, полівінілхлорид (ПВХ), який широко використовується в електроніці, при механічній обробці може виділяти хлористі сполуки, що є шкідливими для здоров'я працівників [16]. Це підкреслює необхідність розробки безпечних методів обробки полімерних відходів та впровадження сучасних технологій, які дозволяють мінімізувати ризики для здоров'я та навколишнього середовища.

У цьому контексті актуальним є впровадження інноваційних підходів до управління полімерними компонентами ВЕЕО, які включають вдосконалення методів збору, сортування, переробки та розробку нових матеріалів, спрямованих на зменшення екологічного впливу. Наприклад, використання автоматизованих систем сортування, таких як оптичні сепаратори та роботизовані лінії, дозволяє значно підвищити ефективність процесу відділення полімерів від інших матеріалів. Крім того, розробка замкнутих циклів використання полімерів демонструє потенціал для зменшення обсягів відходів та економії ресурсів [7].

Таким чином, управління полімерними компонентами ВЕЕО є комплексним завданням, яке вимагає інтеграції технологічних, екологічних та економічних підходів. У цій роботі розглядаються основні аспекти управління полімерними відходами електричного та електронного обладнання, включаючи аналіз існуючих систем збору, методи сортування та переробки, а також рекомендації щодо оптимізації цих процесів. Метою дослідження є розробка науково обґрунтованих підходів до підвищення ефективності управління полімерними компонентами ВЕЕО, що сприятиме зменшенню екологічного впливу та реалізації принципів циркулярної економіки.

Результати дослідження

Аналіз існуючих систем збирання електронних відходів

Полімерні компоненти відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) становлять значну частину загального обсягу електронних відходів. Їх утилізація та переробка є складною задачею через різноманітність хімічного складу, наявність токсичних добавок та технологічні обмеження. Управління полімерними відходами потребує комплексного підходу, що включає вдосконалення методів збору, сортування, переробки та розробки нових матеріалів, спрямованих на зменшення екологічного впливу.

Ефективне управління полімерними компонентами ВЕЕО починається з їх правильного збору та сортування. Існуючі системи збору, такі як муніципальні пункти, роздрібні точки та мобільні збірні пункти, демонструють різний рівень ефективності. Однак для полімерних відходів ключовим завданням є забезпечення їх відокремлення від інших матеріалів, таких як метали та скло.

Ефективне збирання електронних відходів (ВЕЕО) є першою ланкою в системі їхнього управління, від якої залежить успішність подальшої переробки та мінімізація екологічних ризиків. Сучасні системи збирання базуються на різних організаційних моделях, що враховують економічні, соціальні та технологічні особливості регіонів.

Однією з найпоширеніших моделей є муніципальні пункти збору, організовані органами місцевої влади. Наприклад, у Німеччині мережа стаціонарних пунктів Wertstoffhöfe забезпечує збір до 65% ВЕЕО завдяки широкій доступності для населення [13]. Такі системи дозволяють контролювати якість відходів, але потребують значних витрат на утримання, особливо в сільській місцевості.

У країнах із розвинутою інфраструктурою, як Японія, ключову роль відіграють програми розширеної відповідальності виробників (англ. Extended Producer Responsibility, EPR). Згідно з Законом про переробку побутової техніки, виробники зобов'язані збирати до 80% своєї продукції, що стимулює розробку екологічно більш безпечних приладів [1]. Однак ця модель часто стикається з проблемою контролю за дотриманням зобов'язань виробників, особливо в регіонах із слабким регулюванням.

Роздрібні точки збору, інтегровані в мережі магазинів електроніки, забезпечують зручність для споживачів. У США компанія Best Buy через свою систему прийому старих приладів з 2009 року збрала 2,7 мільярда фунтів електроніки та техніки для переробки, що робить їх найбільшим роздрібним збирачем електронних відходів у Сполучених Штатах [17]. Незважаючи на ефективність, такі системи обмежені типами відходів, що приймаються, і часто не охоплюють великогабаритну техніку.

Для покращення доступності в провінційних регіонах використовуються мобільні збірні пункти. Так, у Канаді мобільні рішення, як і стаціонарні модульні системи, є однією з ланок в ланцюгу EPR, де виробники фінансують переробку через збори або власні програми повернення товарів. Згідно з національною моделлю, розробленою у 2004 році, такі ініціативи допомагають зменшити частку ВЕЕО на звалищах (історично – 90%), але потребують подальшого вдосконалення. Наприклад, впровадження цільових показників переробки, стимулів для «зеленого» дизайну продуктів та розширення охоплення віддалених регіонів. Технологічні інновації, такі як автоматизовані

сортувальні лінії у Edmonton Waste Management Centre, демонструють потенціал для підвищення ефективності, але їх впровадження вимагає значних інвестицій [11].

Інноваційним рішенням є депозитно-поворотні системи, які мотивують населення повертати відходи через фінансові стимули. У Швеції така модель застосовується для збору батарей, забезпечуючи рівень повернення 65% [12]. Однак адміністративна складність і високі витрати на впровадження роблять її менш привабливою для країн із низьким рівнем доходів. У таких регіонах переважає неформальний сектор: у Гані та Індії до 90% ВЕЕО збираються приватними компаніями, які продають відходи на переробку [20]. Це забезпечує низьку собівартість збору, але супроводжується серйозними ризиками для здоров'я працівників і забрудненням довкілля через відсутність технологій знешкодження.

Ключові виклики систем збирання включають низьку обізнаність населення. Дослідження Євростату [10] показало, що лише 35% споживачів у ЄС знають про наявність пунктів збору ВЕЕО. Оптимізація маршрутів транспортування стала нагальним питанням для країн із розрізною інфраструктурою.

Одним із перспективних напрямків удосконалення систем збирання ВЕЕО є інтеграція цифрових технологій. Зокрема, використання IoT (Internet of Things) для моніторингу стану контейнерів для збору відходів дозволяє оптимізувати маршрути транспортування та зменшити витрати на логістику. Наприклад, у Великій Британії впроваджено систему Smart Bins, яка автоматично повідомляє операторів про заповненість контейнерів, що значно підвищує ефективність збору [1]. Такі рішення також можуть бути корисними для віддалених регіонів, де традиційні методи збору є неефективними.

Ще одним важливим аспектом є розвиток систем зворотної логістики, які забезпечують повернення відходів від споживачів до виробників або переробників. Це вимагає тісної взаємодії між виробниками, роздрібними мережами та логістичними компаніями. Аналіз сучасних кейсів управління полімерними компонентами відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) демонструє, що ефективне впровадження систем зворотної логістики є ключовим елементом у забезпеченні сталого розвитку та переходу до циркулярної економіки. Одним із найбільш показових прикладів є програма Dell «Closed Loop Recycling», яка реалізує замкнутий цикл використання пластику, зібраного зі старих пристроїв, для виробництва нової продукції [9]. Цей підхід не лише зменшує обсяги відходів, що потрапляють на звалища, але й значно скорочує потребу у використанні первинних матеріалів, що суттєво знижує екологічний слід компанії. Аналогічну стратегію впровадила компанія Apple у рамках програми «Apple Trade In», де використання роботів для розбирання пристроїв дозволяє ефективно відокремлювати полімерні компоненти для подальшої переробки [6]. Такі ініціативи підкреслюють важливість інтеграції інноваційних технологій у процеси зворотної логістики.

Іншим важливим аспектом є співпраця між виробниками, роздрібними мережами та логістичними компаніями, що дозволяє створювати ефективні системи збору та транспортування відходів. Наприклад, програма HP «Planet Partners» демонструє, як організований збір та переробка картриджів для принтерів можуть забезпечити значну економію ресурсів і зменшити викиди вуглекислого газу [23]. Подібні механізми активно використовуються

компанією Samsung у рамках ініціативи «Re+», де спеціальні пункти збору та логістичні мережі забезпечують повернення відходів від споживачів до переробних центрів [24]. Ці приклади підкреслюють, що успішна реалізація зворотної логістики вимагає не лише технічних рішень, але й чіткої координації між усіма учасниками ланцюга поставок.

Важливим елементом у глобальному контексті є нормативне регулювання, яке стимулює виробників до впровадження відповідальних практик управління відходами. Директива Європейського Союзу щодо відпрацьованого електричного й електронного обладнання (Директива ВЕЕО) [2] є яскравим прикладом того, як законодавчі ініціативи можуть сприяти розвитку систем зворотної логістики. В рамках цієї директиви виробники зобов'язані забезпечувати збір та переробку електронних відходів, що включає й полімерні компоненти. Це призвело до значного збільшення рівня переробки ВЕЕО у Європі та створення єдиних стандартів для управління відходами. Таким чином, поєднання технологічних, організаційних та нормативних підходів є необхідною умовою для досягнення ефективності управління полімерними відходами електричного та електронного обладнання.

Узагальнюючи, сучасні кейси свідчать про те, що впровадження систем зворотної логістики для управління полімерними компонентами ВЕЕО є комплексним процесом, який вимагає інтеграції інноваційних технологій, тісної взаємодії між учасниками ланцюга поставок та підтримки з боку законодавчих ініціатив. Такі підходи не лише сприяють зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище, але й відкривають нові можливості для економії ресурсів та створення доданої вартості в умовах циркулярної економіки. Отже, ключовим напрямком розвитку систем збору ВЕЕО стане інтеграція концепції циркулярної економіки, що передбачає створення замкнених циклів використання ресурсів, де відходи стають сировиною для нових продуктів.

Аналіз існуючих способів та засобів для зберігання електронних відходів

Ефективне зберігання відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) є критичним етапом у системі управління цими відходами, оскільки від нього залежить збереження ресурсів, мінімізація екологічних ризиків та забезпечення ефективності подальшої переробки. Сучасна практика передбачає використання різних методів, кожен із яких має специфічні умови застосування, обмеження та переваги.

Один з поширених підходів – тимчасове зберігання відходів безпосередньо на місці їх утворення, наприклад, на території підприємств або в домогосподарствах. Відходи зберігаються в спеціально відведених зонах, часто у вигляді окремих контейнерів або закритих приміщень. Для запобігання окисненню металів або деградації полімерів необхідний захист від вологості, ультрафіолету та механічних пошкоджень. Наприклад, плати зберігаються в антистатичних упаковках, а корпуси приладів – на палетах з поліетиленовим покриттям. Цей метод зберігання дозволяє зменшити витрати на транспортування шляхом консолідації обсягів, а також сприяє попередньому сортуванню. Проте його основним недоліком є високий ризик пошкодження компонентів, зокрема полімерних елементів, що ускладнює їх подальше використання. Крім того, недотримання норм зберігання (наприклад, захисту від вологості або витоку токсичних речовин) може призвести до забруднення навколишнього середовища.

Спеціалізовані центри зберігання, обладнані системами контролю мікроклімату та механічного захисту, пропонують більш безпечні умови для тимчасового накопичення ВЕЕО. Такі об'єкти здатні вміщувати значні обсяги відходів, що робить їх оптимальними для промислових регіонів або міст із високим рівнем споживання електроніки. Незважаючи на ефективність, їх експлуатація вимагає значних фінансових інвестицій, а також регулярного моніторингу для запобігання корозії чи деградації матеріалів.

Спеціалізовані центри зберігання ВЕЕО є ключовими елементами інфраструктури для ефективного управління електронними відходами. В Європі, наприклад, центр Stena Technoworld (Швеція) інтегрує зберігання з попередньою переробкою: відходи розміщуються в герметичних контейнерах з фільтрами для токсичних випарів, а автоматизовані лінії здійснюють дроблення та сепарацію матеріалів. Об'єкт відповідає вимогам Директиви ЄС 2012/19/ЄС [2], ізолюючи небезпечні компоненти (ртутні лампи, батареї) в окремі зони, і обробляє понад 50 тис. тонн відходів щороку [26].

У Бельгії та Німеччині компанія Sims Lifecycle Services створює умови для зберігання ВЕЕО з точним контролем температури (15–20 °С) та вологості. Її центри обладнані автоматизованими конвеєрами для сортування плат, кабелів і полімерних корпусів, а система рециркуляції повітря з HEPA-фільтрами запобігає поширенню токсинів [25]. Ці технології також знаходять розвиток у нідерландському центрі Coolrec, який спеціалізується на переробці великогабаритних побутових приладів.

Coolrec інтегрує передові рішення [8] четвертої промислової революції, зокрема автоматизовані лінії для обробки складних відходів, такі як унікальна система видалення аміаку з холодильників, що відповідає вимогам WEEE-Labex. Для підвищення якості вторинної сировини центр використовує високоточні сепаратори металів, які дозволяють відокремлювати алюміній, мідь та друковані плати без необхідності експортувати відходи за межі ЄС. Цифрові технології забезпечують моніторинг процесів у реальному часі: дані з вагових систем, транспорту та виробничих ліній автоматично інтегруються в єдину платформу, а будь-які відхилення (наприклад, неповна утилізація пристроїв) фіксуються фотозвітами та негайно передаються клієнтам.

Важливим екологічним досягненням Coolrec стала установка рекуперації видувних агентів, яка замість традиційного стиснення використовує охолодження для зрідження шкідливих речовин, запобігаючи їх потраплянню в атмосферу [8]. Для оптимізації логістики впроваджено цілодобовий безпілотний ваговий термінал, що дозволяє знизити вуглецевий слід за рахунок нічного транспортування та аналізу ефективності перевізників.

В Азії прикладом інноваційного підходу є японський Panasonic Eco Technology Center (PETEC) [21]. Він зберігає та переробляє великогабаритні прилади (кондиціонери, пральні машини) у приміщеннях із регульованою вологістю, що запобігає корозії металів. Для демонтажу складних вузлів використовуються роботизовані системи, але енерговитрати на підтримку мікроклімату залишаються високими. У Південній Кореї центр Korea Environment Corporation (K-eco) поєднує зберігання з енергоефективністю: сонячні панелі забезпечують частину енергії, а вакуумні системи збирають пил під час переробки. Окремі модулі для літєвих батарей обладнані термоконтролем, що знижує ризик пожеж [19].

Проте такі центри такого типу стикаються із серйозними обмеженнями. Вартість їх будівництва сягає \$1–2 млн, а до 30% операційних витрат припадає на енергію для підтримки мікроклімату. Не менш важливим є технічне обслуговування: HEPA-фільтри потребують щорічної заміни, а небезпечні компоненти (наприклад, літєві батареї) – постійного моніторингу. Незважаючи на це, подібні об'єкти залишаються невід'ємною ланкою в ланцюгу переробки ВЕЕО, забезпечуючи безпеку зберігання та підготовку матеріалів до подальшого використання.

Найпоширенішим рішенням залишаються контейнерні системи, розміщені в громадських місцях або на територіях підприємств. Такі контейнери забезпечують доступність для населення та бізнесів, дозволяючи швидко здавати дрібну техніку, кабелі або електронні компоненти. Однак їхня ефективність обмежена невеликою ємністю та низьким рівнем контролю за якістю сортування. Часте сміттєве забруднення або неправильна класифікація відходів призводять до деградації матеріалів, зменшуючи їхню придатність до подальшої переробки.

Альтернативою стають модульні системи зберігання, що поєднують гнучкість і технологічність. Вони дозволяють масштабувати об'єми зберігання залежно від потреб, а також інтегрувати елементи автоматизації – наприклад, сенсори для виявлення типу відходів, вбудовані компактні сортувальні лінії або системи пресування для зменшення обсягів. Такі модулі часто обладнуються QR-кодами або RFID-мітками для відстеження джерела відходів, що підвищує прозорість ланцюга поставок. Проте їхнє впровадження вимагає значних інвестицій у інфраструктуру, а також підготовки персоналу для обслуговування складних механізмів.

Для компаній на кшталт Coolrec або Sims Lifecycle Services модульні системи є проміжною ланкою між збором і глибокою переробкою. Вони дозволяють попередньо відсортувати матеріали, ізолювати небезпечні компоненти (наприклад, акумулятори) та підготувати сировину до подальших технологічних процесів, таких як виділення металів або утилізація токсичних речовин. Це особливо критично для великогабаритних приладів, де навіть незначне забруднення може зробити переробку економічно невігідною.

Тому, важливим аспектом є категоризація відходів на етапі зберігання. Відокремлення полімерних компонентів, металів, плат та інших матеріалів дозволяє зменшити ризик їх взаємного забруднення та підвищити ефективність подальшої переробки. Наприклад, полімери, які контактують з токсичними елементами (свинець, ртуть), можуть втратити властивості, що робить їх непридатними для вторинного використання. Проте організація такого зберігання потребує додаткових площ і логістичних рішень, що не завжди є доступними для малих підприємств або регіонів з обмеженою інфраструктурою.

Таким чином, вибір оптимального способу зберігання ВЕЕО залежить від комплексу факторів: обсягів відходів, їх хімічного складу, наявності фінансових та технічних ресурсів. Найбільш перспективними вважаються комбіновані підходи, які поєднують модульні системи, категоризацію матеріалів із суворим дотриманням екологічних стандартів. Це не лише зменшує вплив на довкілля, але й створює основу для замкнених циклів використання полімерів та інших цінних компонентів електронних відходів.

Оптимізація систем збирання та розміщення електронних відходів

Оптимізація систем збирання та розміщення електронних відходів являє собою комплексний процес модернізації та вдосконалення існуючих методологічних підходів до управління відходами електричного та електронного обладнання, що потребує системного аналізу та врахування множини взаємопов'язаних факторів. Даний процес характеризується необхідністю інтеграції технологічних, економічних та соціальних аспектів з метою створення ефективної системи поводження з електронними відходами. При цьому особлива увага приділяється оптимізації матеріальних та інформаційних потоків, що забезпечують безперервність та ефективність процесу збору та подальшої переробки відходів.

Фундаментальним аспектом даної оптимізації виступає створення раціональної інфраструктури збору, що базується на науково обґрунтованому розміщенні стаціонарних та мобільних пунктів прийому з урахуванням демографічних показників та територіального розподілу населення. Важливим етапом проектування такої інфраструктури є проведення детального аналізу просторового розподілу джерел утворення електронних відходів, що включає дослідження щільності населення, рівня економічного розвитку регіонів, специфіки споживання електронної техніки різними категоріями населення. На основі отриманих даних здійснюється математичне моделювання оптимального розташування пунктів збору з використанням методів просторового аналізу та геоінформаційних технологій.

Суттєвим аспектом оптимізації є врахування сезонних коливань у обсягах утворення електронних відходів та специфіки їх компонентного складу. Це дозволяє забезпечити адаптивність системи збору та її здатність ефективно функціонувати в умовах змінного навантаження. При проектуванні інфраструктури збору також враховуються технічні характеристики транспортних засобів, що використовуються для перевезення відходів, та особливості дорожньої мережі, що впливають на доступність пунктів збору для населення та ефективність логістичних операцій.

Важливо відзначити, що створення раціональної інфраструктури збору електронних відходів повинно супроводжуватися розробкою відповідного інформаційного забезпечення, яке включає системи обліку та контролю руху відходів, бази даних про джерела їх утворення та методи переробки, а також засоби інформування населення про можливості та правила здачі відпрацьованої техніки. Це дозволяє забезпечити прозорість процесів управління відходами та підвищити рівень залучення населення до їх роздільного збору.

Імплементация автоматизованих систем сортування та первинної обробки електронних відходів безпосередньо у пунктах збору зумовлює значне підвищення ефективності логістичних процесів. Зазначені системи забезпечують селективну сепарацію компонентів відповідно до їх фізико-хімічних властивостей, що суттєво оптимізує подальші процеси переробки та утилізації.

Особливої уваги заслуговує питання проектування та експлуатації спеціалізованих сховищ тимчасового зберігання електронних відходів, що являє собою складну інженерно-технічну задачу. Дані об'єкти повинні відповідати комплексу технічних вимог щодо підтримання оптимальних параметрів мікроклімату, що є критично важливим для запобігання деградації

полімерних компонентів та емісії токсичних речовин. При цьому особлива увага приділяється системам вентиляції та кондиціонування, які повинні забезпечувати не лише підтримання заданих параметрів температури та вологості, але й ефективне видалення потенційно небезпечних газоподібних продуктів розкладання полімерів. Технічне оснащення сховищ має включати автоматизовані системи контролю температури та вологості та забезпечення протипожежної безпеки, інтегровані з центральною системою моніторингу та управління.

Важливим аспектом проектування сховищ є розробка систем сортування та розміщення відходів з урахуванням їх хімічного складу та потенційної небезпеки. Це передбачає створення окремих секцій для зберігання різних типів електронних відходів, обладнаних спеціальними системами нейтралізації можливих викидів та захисту від протікання небезпечних речовин. Особлива увага приділяється системам зберігання акумуляторів та інших компонентів, що містять важкі метали та токсичні сполуки.

Економічний аспект оптимізації базується на розробці та впровадженні науково обґрунтованих механізмів економічного стимулювання, що враховують специфіку місцевих ринків вторинної сировини та потенціал переробки різних компонентів електронних відходів. Емпіричні дослідження демонструють високу ефективність впровадження депозитно-повернутих систем та програм матеріального заохочення населення до відповідального поводження з електронними відходами. При цьому важливим є врахування регіональних особливостей формування тарифів на переробку та утилізацію відходів, а також розробка механізмів компенсації витрат на транспортування та зберігання.

Інтеграція вищезазначених компонентів у єдину систему потребує застосування системного підходу та проведення комплексного аналізу взаємозв'язків між окремими елементами, що включає оцінку технологічних, економічних та екологічних аспектів. Впровадження оптимізаційних заходів призводить до підвищення коефіцієнта вилучення цінних компонентів та зниження негативного впливу на навколишнє середовище. При цьому необхідним є проведення регулярного моніторингу ефективності впроваджених заходів з використанням сучасних методів статистичного аналізу та математичного моделювання для своєчасного коригування параметрів системи.

Суттєвим елементом оптимізації є впровадження систем автоматизованого контролю якості відсортованих матеріалів, що дозволяє підвищити ефективність подальшої переробки та знизити витрати на додаткове сортування. Такі системи можуть включати спектральні аналізатори для визначення складу полімерних матеріалів, рентгено-флуоресцентні аналізатори для ідентифікації металів, а також системи машинного зору для сортування компонентів за зовнішніми ознаками.

Рекомендації щодо відділення полімерних компонентів електронного обладнання

У процесі управління відходами електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) особливу увагу слід приділити відділенню полімерних компонентів, оскільки це суттєво впливає на ефективність подальшої переробки та утилізації матеріалів. На основі проведених досліджень можна сформулювати наступні рекомендації щодо оптимізації цього процесу.

Перш за все, необхідно забезпечити попереднє сортування ВЕЕО за категоріями обладнання. Це дозволяє врахувати особливості конструкції різних типів пристроїв та застосувати найбільш ефективні методи демонтажу для кожної категорії. Наприклад, корпусні деталі комп'ютерної техніки зазвичай кріпляться за допомогою гвинтових з'єднань, тоді як побутова техніка часто має зварні або клейові з'єднання, що вимагає різних підходів до розбирання.

Візуальна ідентифікація типів полімерів є критично важливим етапом у процесі управління відходами електричного та електронного обладнання (ВЕЕО). Цей процес дозволяє швидко і точно визначити типи пластиків, що містяться в електронних відходах, що, в свою чергу, сприяє їх ефективному сортуванню та переробці.

Рекомендується використовувати маркування відповідно до стандарту ISO 11469 [18], яке зазвичай наноситься на великі пластикові деталі. Це маркування дозволяє відразу розділяти основні види термопластів, такі як акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полістирол (PS), полікарбонат (PC) та поліпропілен (PP). Наприклад, ABS використовується для виробництва корпусів комп'ютерів і моніторів, тоді як PS застосовується для виготовлення упаковки та ізоляційних матеріалів. Полікарбонат часто використовується для виробництва прозорих вставок і панелей, а поліпропілен знаходить застосування в різноманітних деталях електронних пристроїв.

Використання маркування за стандартом ISO 11469 [18] забезпечує чистоту відсортованих фракцій, що є важливим для подальшої переробки. Чисті фракції полегшують процес рециклінгу, зменшуючи ризик забруднення та підвищуючи якість вторинних матеріалів. Правильна ідентифікація та сортування пластикових компонентів ВЕЕО можуть суттєво зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Це також сприяє реалізації принципів циркулярної економіки, де відходи перетворюються на ресурси, що повторно використовуються у виробництві.

Для підвищення ефективності відділення полімерних компонентів доцільно розробити технологічні карти розбирання типового обладнання. Такі карти повинні містити послідовність операцій демонтажу, необхідний інструмент та особливості конструктивних з'єднань. Це значно прискорює процес та знижує ризик пошкодження деталей. Згідно з дослідженнями [16], розробка детальних технологічних карт дозволяє зменшити час розбирання обладнання на 20-30%, а також знизити кількість пошкоджень матеріалів.

При механічному відділенні полімерних компонентів слід враховувати наявність металевих вставок, армуючих елементів та інших композитних матеріалів. Рекомендується використовувати спеціалізований інструмент, який мінімізує утворення сколів та пилу. Особливу увагу варто приділити техніці безпеки, оскільки деякі полімери при механічній обробці можуть виділяти шкідливі речовини. Наприклад, полімерні матеріали, такі як ПВХ, при механічній обробці можуть виділяти хлористі сполуки, що є токсичними для людини [16].

Для великогабаритного обладнання ефективним є застосування напівавтоматичних ліній розбирання. Такі лінії повинні бути обладнані конвеєрними системами, робочими станціями для різних операцій та контейнерами для роздільного збору матеріалів. Це дозволяє організувати потоковий процес та підвищити продуктивність праці. Як зазначають дослідники [15], використання напівавтоматичних ліній дозволяє збільшити продуктивність на 40-50% порівняно з ручним розбиранням.

З метою підвищення якості відсортованих полімерів рекомендується проводити додаткову очистку від забруднень та видалення металевих включень. Для цього можуть використовуватися методи флотації, магнітної сепарації та промивки спеціальними розчинами. Важливо враховувати, що наявність домішок суттєво знижує можливості подальшої переробки полімерів.

Необхідно також забезпечити належні умови зберігання відсортованих полімерних компонентів. Рекомендується використовувати закриті контейнери або біг-беги, які захищають матеріал від атмосферних впливів та забруднень. Важливо організувати маркування та облік відсортованих фракцій для подальшої логістики. Як зазначають експерти [14], правильне зберігання та маркування полімерних матеріалів є ключовим фактором для їхньої ефективної переробки та повторного використання. Впровадження запропонованих рекомендацій дозволить оптимізувати процес відділення полімерних компонентів ВЕЕО та підвищити економічну ефективність їх подальшої переробки. При цьому слід регулярно проводити моніторинг та оцінку ефективності застосованих методів з метою їх удосконалення та адаптації до змін у конструкції сучасного електронного обладнання.

Висновки

Управління полімерними компонентами відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) є складною та багатоаспектною проблемою, яка потребує інтеграції технологічних, екологічних та економічних підходів. Полімерні матеріали, що становлять значну частину ВЕЕО, характеризуються різноманітністю хімічного складу, наявністю токсичних добавок та технологічними обмеженнями, що ускладнює їх переробку. Невідповідна утилізація таких відходів призводить до серйозних екологічних наслідків, включаючи забруднення навколишнього середовища токсичними речовинами та втрату цінних ресурсів, які могли б бути повторно використані в рамках циркулярної економіки.

Ефективне управління полімерними компонентами ВЕЕО починається з їх правильного збору та сортування. Існуючі системи збору, такі як муніципальні пункти, роздрібні точки та мобільні збірні пункти, демонструють різний рівень ефективності. Однак ключовим завданням є забезпечення відокремлення полімерних відходів від інших матеріалів, таких як метали та скло, що вимагає впровадження інноваційних технологій сортування, зокрема автоматизованих систем та оптичних сепараторів. Важливим елементом є також розвиток систем зворотної логістики, які забезпечують повернення відходів від споживачів до виробників або переробників, що сприяє замкнутим циклам використання ресурсів.

Зберігання ВЕЕО є критичним етапом у системі управління цими відходами, оскільки від нього залежить збереження ресурсів та мінімізація екологічних ризиків. Спеціалізовані центри зберігання, обладнані системами контролю мікроклімату та автоматизованими лініями сортування, демонструють високу ефективність, але вимагають значних фінансових інвестицій. Для покращення доступності та ефективності зберігання рекомендується використання модульних систем, які дозволяють масштабувати обсяги зберігання та інтегрувати елементи автоматизації.

Категоризація відходів на етапі зберігання, зокрема відокремлення полімерних компонентів від інших матеріалів, є важливим кроком для підвищення якості подальшої переробки.

Оптимізація систем збору та розміщення ВЕЕО вимагає комплексного підходу, що включає створення раціональної інфраструктури збору, врахування сезонних коливань у обсягах утворення відходів та інтеграцію автоматизованих систем сортування. Важливим елементом є також проектування спеціалізованих сховищ тимчасового зберігання, які повинні відповідати вимогам щодо підтримання оптимальних параметрів мікроклімату та забезпечення протипожежної безпеки. Економічний аспект оптимізації включає розробку механізмів економічного стимулювання, таких як депозитно-повернені системи, що сприяють залученню населення до відповідального поводження з відходами.

Відділення полімерних компонентів ВЕЕО є ключовим етапом у процесі їх переробки. Для підвищення ефективності цього процесу рекомендується використання маркування за стандартом ISO 11469, що дозволяє швидко ідентифікувати типи пластиків та забезпечити чистоту відсортованих фракцій. Розробка технологічних карт розбирання типового обладнання, використання спеціалізованого інструменту та напівавтоматичних ліній розбирання дозволяють значно прискорити процес та знизити ризик пошкодження матеріалів. Додаткова очистка відсортованих полімерів від забруднень та металевих включень є важливим кроком для підвищення якості вторинної сировини.

Узагальнюючи, управління полімерними компонентами ВЕЕО вимагає інтеграції інноваційних технологій, тісної взаємодії між учасниками ланцюга поставок та підтримки з боку законодавчих ініціатив. Впровадження запропонованих підходів дозволить не лише зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, але й створити нові можливості для економії ресурсів та реалізації принципів циркулярної економіки. Регулярний моніторинг та оцінка ефективності застосованих методів є необхідними для їх удосконалення та адаптації до змін у конструкції сучасного електронного обладнання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Bublyk, M. I. (2012). Mekhanizm rehuliuвання tekhnohennykh zbytkiv promyslovykh pidpriemstv: lohistyka retsykluvannya yak instrument yoho zastosuvannya *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*, (749), 530–537. (In Ukrainian). [Бублик, М. І. (2012). Механізм регулювання техногенних збитків промислових підприємств: логістика рециркулювання як інструмент його застосування. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. № 749: Логістика. С. 530–537].
2. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (2012). [Директива Європейського Парламенту і Ради 2012/19/ЄС від 4 липня 2012 року про відходи електричного та електронного обладнання (ВЕЕО)]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_030-12#Text
3. Kolomiets, T. M., Karavaiev, T. A., & Hlushkova, T. H. (2021). Polimerni vidkhody: problemy nakopychennia ta vtorynnoi pererobky. *Visnyk LTEU. Tekhnichni nauky*, (26). (In Ukrainian). [Коломієць, Т. М., Караваєв, Т. А., Глушкова, Т. Г. (2021). Полімерні відходи: проблеми накопичення та вторинної переробки. *Вісник LTEU, Технічні науки*. № 26]. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-26-12>
4. Aizawa, H., Yoshida, H., & Sakai, S. (2008). Current results and future perspectives for Japanese recycling of home appliances. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(12), 1399–1410. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.013>

5. Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
6. Apple. (n.d.). *Apple Trade In*. <https://www.apple.com/shop/trade-in>
7. Dell Technologies. (2020). *Closed loop recycling program*. <https://www.dell.com/uk-ua/lp>
8. Coolrec plastics. <https://www.coolrec.com/en/plastics>
9. Dell Technologies. (2024). *Environmental, social and governance report*. <https://www.delltechnologies.com/asset/en-ca/solutions/business-solutions/briefs-summaries/delltechnologies-fy24-esg-report.pdf>
10. Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat>
11. Schroeder & Schroeder. (n.d.). *E-waste management in Canada*. <https://schroeder-inc.com/white-papers/e-waste-management-in-canada/>
12. Forti, V., Baldé, C. P., & Kuehr, R. (2018). *E-waste statistics: Guidelines on classifications, reporting and indicators* (2nd ed.). United Nations University. ViE – SCYCLE, Bonn, Germany.
13. Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University; UNITAR; ITU; ISWA. Bonn/Geneva/Rotterdam.
14. Garcia, J. M., & Robertson, M. L. (2017). The future of plastics recycling. *Science*, 358(6365), 870–872. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0324>
15. Gutowski, T. G., Dahmus J., Thiriez A. (2011). Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. *Proceedings of the ICE, Energy 2*. 2006, 1-15. https://www.researchgate.net/publication/228347560_Electrical_Energy_Requirements_for_Manufacturing_Processes
16. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
17. Best Buy. (2023). *How to recycle (or trade in) your old tech*. <https://corporate.bestbuy.com/2023/how-to-recycle-or-trade-in-your-old-tech/>
18. ISO 11469:2016. Plastics – Generic identification and marking of plastics products. Published (Edition 3, 2016). <https://www.iso.org/standard/63434.html>
19. Korea Environment Corporation. <https://www.keco.or.kr/en/index.do>
20. Lundgren, K. (2012). *The global impact of e-waste: Addressing the challenge*. International Labour Office. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%E2%80%94dialogue/%E2%80%94sector/documents/publication/wcms_196105.pdf
21. Panasonic eco technology center. <https://panasonic.net/eco/petec/>
22. Ragaert, K., Delva, L., & Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
23. HP. (n.d.). *Repurpose and recycle today*. <https://www.hp.com/us-en/sustainable-impact/planet-product-recycling.html>
24. Office of Sustainable Solutions. (2023, January 24). Samsung oholoshuie pro novu ekologichnu stratehiiu dlia borotby zi zminoiu klimatu [Samsung oholoshuie pro novu ekologichnu strategiyu dlya borotby-zi-zminoyu-klimatu]. <https://ukraine-oss.com/samsung-ogoloshuie-pro-novu-ekologichnu-strategiyu-dlya-borotby-zi-zminoyu-klimatu/>
25. Sims lifecycle services. <https://www.simslifecycle.com/>
26. Stena technoworld. <https://www.stenarecycling.com/>
27. E-waste Monitor. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020 – Quantities, flows, and the circular economy potential*. <https://ewastemonitor.info/gem-2020/>

Стаття надійшла до редакції 03.12.25, надійшла після рецензування 23.01.26, прийнята 25.02.26

The article was received 03.12.25, received after revision 23.01.26, accepted 25.02.26

Євгеній Гречанюк

аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет

Адреса робоча: 21000, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5687-2269>

Віталій Іщенко

кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет

Адреса робоча: 21000, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-1096>

V.Kh. Qasimova¹, Doctor of Biotechnological Sciences, teacher
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-3305-8450> **e-mail:** vafaxal@outlook.com

F.V. Hasanli², graduate student, teacher
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-7929-4326> **e-mail:** feridahasanli@gmail.com

L.R. Karimova¹, Candidate of Biological Sciences, teacher
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-5950-9543> leylikarimova@bsu.edu.az

T.A. Kholina¹, Candidate of Biological Sciences, teacher
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-1098-9369> **e-mail:** tatyanaxolina2302@gmail.com

¹ Baku State University, Baku, Azerbaijan

² Minqecevir State University, Minqecevir, Azerbaijan

SIGNIFICANCE OF POLYENE ANTIBIOTICS IN INCREASING OF MEMBRANE PERMEABILITY AND IN TREATMENT ANIMAL AND PLANT INFECTION

Abstract. *It is shown that using polyene antibiotics (PA) in combination with dimethyl sulfoxide sharply increase ionic permeability membranes and biological activity of antibiotics. The comparative physical and chemical characteristics of dimethyl sulfoxide and PA is consideration. The effects of a complex interaction and PA examined by the bilayer lipid membranes (BLM). By the method of determine the parameters biological activity of PA it was show that off all the most studied PA promises more effective were amphotericin B and levorin. Results are started according to BLM conduction of cholesterol in the membranes. On the basis of PA developed an ecological model of environmental protection by establishing membrane–active concentration of PA against viral, fungal and bacterial infection for animals and plants. Using polyene antibiotics (PAs) in combination with dimethyl sulfoxide (DMSO) was shown to increase ion permeability of membranes and biological activity of antibiotics sharply. The comparative physical and chemical characteristics of dimethyl sulfoxide and PAs were determined. The effects of a complex relation between PAs and the bilayer lipid membranes (BLM) were studied. The parameters of biological activity of PAs and BLM were determined. It was shown that among all the studied PAs, amphotericin B and levorin were the most effective. Ion permeability of BLM was shown to depend on the concentrations of amphotericin B, levorin and cholesterol. On the basis of PAs, biological active preparations were developed against viral, bacterial and fungal diseases. It has been shown that the used preparation can completely prevent the growth of the Tobacco mosaic virus. It should be especially noted that after treatment with the “Infanvir” preparation the infected plants are not only cured but also regenerated in full. Moreover, the vegetable plants treated with such preparation had 2 times more harvest than the reference ones. It is supposed that the antiviral and antifungal effect of the “Infanvir” preparation is related to their interaction with lipid components of cytoplasmic membranes, causing destruction of the structure of pathogenic microorganism cells.*

Keywords: *polyene antibiotics, dimethyl sulfoxide, amphotericin B, levorin, lipid membranes, membrane permeability, animal and plant infection.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.69-78>

Introduction

Polyene antibiotics are one of the most effective compounds in the fight against fungal infections [Borowski, 2000, Gray et al; 2012]. The main representatives of the PA are amphotericin B, nystatin, mycoheptin and levorin, the chemical structure of which is shown in fig. 1. Molecules PA contain in its composition lactone ring, conjugated system of double bonds and hydrophilic chain consisting of the hydroxyl and carbohydrate groups. Biological activity PA is dependent on the presence of sterol in the cell membranes of defined sterol structure [Recamier et al., 2010]. Polyenes are more sensitive to the membranes, in which structure contains ergosterol [Ciesielski et al., 2016]. Thanks to this aspect of the polyenes used in medicine for therapeutic purposes. Currently for the treatment of the systemic fungal infections are mainly used, amphotericin B and nystatin. Comparative analysis of the biological activity of amphotericin B and nystatin shows that the amphotericin B is approximately 6 fold more effective against the majority of fungi than nystatin [Azaltos et al., 1985]. On BLM amphotericin B shown that, the conductivity of the channel about B 10 times higher than nystatin channel [Kasumov, 2009]. Amphotericin B and nystatin are very close to each other in their chemical structure, but with membrane cholesterol amphotericin B more sensitive than to nystatin. Studies have shown that the presence of a certain number of double bonds in the chromophore PA is an important factor that determines their biological activity [Samedova et al., 2018]. Amphotericin B and Nystatin differ by the number of double bonds in the polyene structure chromophore molecules. Nystatin double bonds is less than the Amphotericin B and nystatin however biological activity markedly. PA selection as the object of the study was not accidental. The peculiarity of the PA is that it is only in the nature of a class of compounds that form in cell membranes and lipid structural channels of molecular dimensions, that selectively permeable to ions and organic compounds [Ibragimova et al., 2006; Kasumov 2009; Recamier et al., 2010; Cohen, 2010].

Studies of the molecular mechanism of interaction of PA with membranes showed that polyenes in combination with sterols create in the membrane channels of particular structure [Kasumov, 2009]. However, despite the presence of large amounts of PA and their derivatives, none of them on the effectiveness of its action can't be compared with amphotericin B and levorin in the treatment of systemic fungal infection. In recent years, the efforts of scientists aimed at getting new dosage forms PA and development of new ways their delivery to the affected organs and tissue. Studies have shown that the presence of a certain number of double bonds in the chromophore PA is an important factor that determines their biological activity. Amphotericin B and Nystatin differ by the number of double bonds in the polyene structure chromophore molecules. Nystatin double bonds is less than the Amphotericin B and nystatin however biological activity markedly. PA selection as the object of the study was not accidental. The peculiarity of the PA is that it is only in the nature of a class of compounds that form in cell membranes and lipid structural channels of molecular dimensions, that selectively permeable to ions and organic compounds [Ibragimova et al., 2006; Kasumov 2009; Recamier et al., 2010; Cohen, 2010].

Studies of the molecular mechanism of interaction of PA with membranes showed that polyenes in combination with sterols create in the membrane channels of particular structure [Kasumov, 2009]. However, despite the presence of large

amounts of PA and their derivatives, none of them on the effectiveness of its action can't be compared with amphotericin B and levorin in the treatment of systemic fungal infection. In recent years, the efforts of scientists aimed at getting new dosage forms PA and development of new ways their delivery to the affected organs and tissue. Interest in the antifungal drugs has increased even more due to the high prevalence of HIV infection [De Marie et al., 1994]. There is evidence with about 90% of HIV patients infected amazed fungal infection, due to a sharp weakening of the immune system [Mamidi et al., 2002]. Furthermore transplantation of different organs and bone marrow of patient are assigned immunosuppressive drugs. However, they are creating conditions for the emergence of HIV patients and fungal infections [Sepkowitz, 2002]. Growing interest of scientists to study the mechanism of action has stimulated PA on our side parties need even more in-depth study of Pas mechanism of action at the molecular level. This was large contributed PA deciphering the chemical structures and the development of ways to modify the polyene molecule [Zotchev, 2008; Baginski, Czub, 2009]. The use of antibiotics with known molecular structure makes it possible to study at the molecular level. The basic idea of this work is that by examining the physico-chemical properties of PA conjunction with DMSO to determine the degree of enhancement of the biological activity of the PA.

Materials and methods

PA is highly soluble in DMSO. Polyenes have amphoteric properties. They form a cation in an acidic medium and in an alkaline-anion [Yu, Quinn, 1994]. In conjunction with DMSO are liquid polyenes dark yellow color, bitter taste, and odor. In the preparation of the active form of PA antibiotic first converting the substance from a crystal to the molecular form. After thorough mixing, the composition of the PA is maintained with DMSO overnight at room temperature. The liquid is then filtered and stored in a dark, cool place. The result is a mother of PA solution, ready for use. Application of the PA in this combination of components is highly efficient.

The biological activity is determined by the PA bilayer lipid membrane (BLM) [Ibragimova et al., 2006]. BLM were prepared from total phospholipids isolated from cells by applying a drop of phospholipids per hole in Teflon cell. Total cholesterol was purified phospholipids and neutral lipids other washing acetone and kept at 0°C at a concentration of 20 mg/ml in chloroform-methanol solution at a volume ratio (2:1).

Integral membrane conductivity was studied as a function of concentration of antibiotic reached maximum conductivity of the membrane, which is taken as an active component of the PA. Understanding the mechanism of functioning of the PA in the membranes were prepared by BLM method [15]. Combined measurement of the electrical characteristics of lipid membranes in current clamp mode, and the membrane voltage. The measurement of the membrane potential (E_m) in current clamp mode. Aqueous solutions surrounding the membrane, mixed with a magnetic stirrer. The method is based on the ability of the PA dramatically increases the permeability of the lipid membrane to the corresponding ions by detecting changes in the electrical conductivity of the membrane. Research and measurement integral conductivity of the membrane potential were current using electrometric Keithley-301 (USA).

Results and its discussion

Dimethyl Sulfoxide ($(\text{CH}_3)_2\text{SO}$) obtained by the oxidation of the dimethyl sulfide ($(\text{CH}_3)_2\text{S}$) with nitric acid (Vaisman, Berkowitz, 1992.) Currently as the oxidant for oxidant for this purpose take hydrogen peroxide H_2O_2 . Dimethyl sulfoxide is the first member of the homologous series sulfoxide R_2SO . In their further oxidizing a sulfone R_2SO_2 . The chemical structure of DMSO is clear, colorless, slightly bitter-tasting liquid from its own odor, highly soluble in water [Yu Quinn, 1994]. Organic sulfoxides have a pyramidal structure with the sulfur atom at the apex. The sulfoxides ($\text{RR}'\text{SO}$) radicals R and R' differ from each other and exist in two optically active forms. Amphiphilic molecule DMSO and high level. The negative pole of the dipole is on the oxygen atom. DMSO has a streamlined structure which follows from the temperature dependence of refractive index, density, viscosity and other characteristics. Protophilic DMSO solvent, and therefore its associates are easily destroyed by the addition of substances that are proton donors. Studies of the absorption spectra of DMSO in the wavelength range of 350 nm-2200 nm show that the spectrum of DMSO a number of organic compounds usually used study their physico-chemical characteristics and molecular structures [Yu, Quinn, 1994]. Table 1 shows some physical characteristics and DMSO and waters. Relatively high boiling point and large latent heat of vaporization (53J/M at 25 C) indicate that DMSO B molecules are aligned with each other, forming a polymeric chain due to oxygen bonds [Vaisman, Berkowitz, 1992]. DMSO inherent properties such as amphiphility, polarity, high resorption.

Studies of the biological activity of polyene antibiotics PA indicate that these compounds interact specifically with sterols antibiotic sensitive organisms such as fungi and elementary [Gray et al., 2012]. Researches molecular mechanism of interaction of PA with membranes that create in membrane polyenes channels through which cells from the outer environment may diffuse ions and intracellular components leading to cell lysis [Cohen, 2010]. It has been suggested that the biological activity of (PA) may depend on the nature of molecular interactions between the charged groups of phospholipid molecules and antibiotics. It expects that the membrane occurs as a result of hydrogen bonding between the (PA) and phosphate groups of phospholipid molecules. Comparative analysis of the biological activity of amphotericin B and nystatin shows that the amphotericin B is more effective against fungi than nystatin [Aszalos et al., 1985].

Comparative data show that at the polyene chain of amphotericin and nystatin A1 and A is the same as studies have shown antifungal activity of these two antibiotics identical to each other. These data suggest that the presence of definite number of double bonds in the chromophore of (PA) is an important factor in determining their sensitivity to the membranes. There is a direct correlation between the number of double bonds in the chromophore and biological activity of antibiotics. The higher the number of double bonds in the chromophore, (PA) the higher biological activity [Kasumov, 2009].

Levorin antibiotic have higher selectivity of action on the membrane and different from the other antibiotics polyene increased water solubility. The structure of the lipid bilayer, as well as the structure itself penetrating molecules is an important factor that contributes to the permeability of solubility in aqueous compounds. The molecules DMSO have a high degree of resorption by the fact that the value of the permeability DMSO located between water and fat. Table 1. It is suggest that DMSO

increases the permeability of the large number of drug compounds across biological membranes, and promotes their penetration deep enough into the cell. The molecules DMSO increases and promotes membrane penetration substrates deep enough into the cell.

Table 1. Physical properties of DMSO and water

Physical properties	DMSO	Water
Molecular weight	78.13	18.02
Density at 20°C	1.1014	18.02
Melting point 20°C	18.4	0.00
Boiling point	189.0	100.00
Surface tension at 20°C (10 ⁻³ x Pa x c)	46.2	72.75
Viscosity at 20°C (10 ⁻³ x Pa x c)	2.20	1.002
Dielectric constant at 20°C	48.9	80.20

First physic-chemical properties of amphotericin B were studied and levorin in combination with DMSO and mixed in different ratios. The dependence of the biomolecular membrane conductivity on the concentration of amphotericin B and levorin. Amphotericin B dramatically increases membrane permeability for ions and water, and non-electrolyte organic compounds. The dependence of the membrane on the concentration of amphotericin B increases the proportionality eighth to the tenth degree and extent of this depends on the structure of molecules PA. The sharp dependence of membrane conductivity on the concentration of amphotericin B allowed suggested that the ion permeability is associated with the formation of channels in the membranes polyene oligomeric structure.

By increasing DMSO concentration aqueous solution increases polyene channel assembly efficiency and enhanced stability of the channel in the conducting state. Amphotericin B at a concentration 1x10⁻⁶ M in 10⁵-10⁶ again reduces the native resistivity membrane (1-5x 10⁻⁸Om/sm²), prepared from total phospholipids. Shows the dependence of the conductivity on the concentration of biomolecular membranes of the amphotericin B at different concentration of cholesterol in membranes. Biomolecular membrane conductivity depending on the concentration of amphotericin B. The membranes of phospholipids with cholesterol in a weight ratio 20:1. Membranes were formed in solution 10 ml KCL, pH = 6, 5, t = 22C. The addition of cholesterol to phospholipids increases permeability membranes in the presence of amphotericin B for selective one valence anions.

However, in the study of aromatic antibiotic it was found that, unlike amphotericin B levorin is not selective permeability to anions and cations of alkali metals. Levorin differ from antibiotic nystatin, amphotericin B and mycoheptine molecules by the presence of additional aromatic groups – p-aminoacetophenone, which contains a positively charged nitrogen. With increasing concentrations of the antibiotic membrane conductivity increases in proportion to the 4th degree of concentration levorin. Depending on the study on the concentration of membrane conductance levorin led to speculation about the presence in the membranes of channels of molecular dimensions, inducing ion permeability. One might think that selective permeability to cations associated with the formation of negatively charged membrane pore. Rather, transfer of cations through the membrane though the border of the channel hydrophilic. Important information on the mechanism of membrane

permeability in the presence of aromatic antibiotic can be recovered from the data transfer through the membrane of small ions, such as guanidine and hydrazine. Levorin in the presence of these ions, permeate through the membrane, rather than the ions K and Na.

The presence of the same number of double bonds in the chromophore levorin and amphotericin B is an important factor determining their high sensitivity to membranes. Studies have shown that the most effective of the studied PA are amphotericin B and levorin. A special role in the formation of conductive channels of levorin and amphotericin within the membrane belongs dimethyl sulfoxide DMSO. DMSO has the ability to greatly enhance the biological activity of the PA and to induce in the membranes of selective permeability to ions and organic compounds. Give the result of the experiments suggest that the selective action mechanism is based on specific molecular interactions with membranes antibiotics.

Studies conducted showed that the chromophores PA molecules interact with phospholipids, form a channel in a stoichiometric ratio of 1:1. Stoichiometric coefficient assembly of single channels for different PA may differ from each other and to be equal to between 3 and 17A (Ibragimova et al., 2006). Computer analysis showed that the formation of ion channels in presence of an amide derivative of amphotericin B ionizing group of molecules can be addressed both inside and outside the channel, i.e. polar groups may be in two conformational forms mycosamine through rotation around the glycoside linkages. There is an assumption that the biological activity of the PA may depend on the nature of intermolecular interactions between charged groups molecules antibiotics into the membrane occurs due to the formation of hydrogen bonds between PA and phospholipid molecules.

Practical significance of the work

Widely used antibiotics in livestock crop received after became apparent adverse effects on the suppression of phytopathogenic microflora send useful species of birds and animals that feed on plant pollination. Antibiotics possess a number of valuable benefits to combat phytopathogenic microorganisms as compared to other substances. Antibiotics have a selective effect and inhibiting the development of pathogenic bacteria and fungi, virtually harmless to plants and animals [Lewis, Papavizas, 1987; Ibragimova et al., 2014]. When selected an antibiotic necessary condition is the absence of toxicity. For example, PA used in low concentrations. (10^{-6} - 10^{-4} M), are not toxicity for plants and animals. Studies shown that most used antibiotic well into absorbed in animal and plant tissue concentration of antibiotic. Required for suppression of pathogenic organisms in the tissues of animals and plants depends on the properties of the antibiotic and the external conditions. As a basis for development of effective antiviral, antibacterial and antifungal drugs PA. Based on the obtained data, calculated minimum concentration of the maximum of its biological activity. Studies have revealed a group of PA new compounds which has the ability to effectively and selectively inhibit pathogenic infection. It was established that preparation able to inhibit viral and fungal infections of plants. Processing plants infected with viral or fungal infection, by spraying a solution leads to the effective disposal of plant infections. As a result of laboratory tests of soil samples, which are grown vegetables, it was found that in the soil contains a small amount of nitrogen, high phosphorus and a small amount potassium pH of the soil sample is weakly alkaline. In Tab. 2 shows the composition of the soil on the mineral elements on the basis of soil gradation.

Table 2. Soil composition of mineral elements on the basis of soil gradation

Sample name	pH	The degree to which soil is provided with mineral elements on the basis of soil gradation			Conductivity on particle size distribution of the soil (mS)	NaCl (mg/kg) standard 150-300	KCl (mg/kg) standard 350-700
		nitrogen 40-120 mg/kg	phosphorus 15-60 mg/kg	potassium 300-600 mg/kg			
		Index of mineral sample provision					
		nitrogen N NH ₃ mg/kg	phosphorus P ₂ O ₂ mg/kg	potassium K ₂ O mg/kg			
SOIL	7,55	7,76	133,32	212,08	1,18	520	516

Despite the missing mineral elements in the soil aphids grown culture studies have shown the high efficiency of the drug on the pathogens of vegetables. It should be noted that preparation has the ability to completely inhibit the growth of the tobacco mosaic virus (Tobacco mosaic virus) (Ibragimova, et al., 2014). Infected plants after preparation treatment not only recover, but regeneration occurs wilted plants from infection. It assumed that anti-virus and anti-fungal effect preparation shown by binding of the antibiotic to the membranes with subsequent formation of the complex in them, which is a channel formation of the drug inhibitory as reproduction of viruses and fungal cells. The proposed facility is non-toxic, harmless drug that can be used by environmental pollution and promote sustainable use of its agriculture with the cultivation of vegetable and fruit crops. In the course of basic research was the first to develop a new preparation against viral, bacterial and fungal infections. It was studied the action of the preparation formed by microorganisms *Streptomyces*, *Staphylococcus* a number of pathogens *Escherichia* *Candida albicans*, and opportunistic bacterial and viral Coxsackie A, ECHO and herpes simplex virus type I and II antimicrobial activity preparation studied in various assay systems. Established that preparation at low concentrations (10⁻¹⁰-10⁻⁶ M) has antibacterial and antifungal effects on the culture *Salmonella typhimuium*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus vulgaris*, *Escherichia coli* gram-positive culture *Staphylococcus aureus* and fungi *Candida albicans* cells, as well as antiviral activity lain on Coxsackie A.20, ECHO 9 and herpes simplex type I and II. For both preparation obtained Eurasian patents.

Conclusions

It was shown that membrane-active compounds of “Infanvir” have the ability at low concentration (10⁻⁷-10⁻⁶ M) to annihilate the pathogenic microorganisms. The characteristic molecule of “Infanvir” is that simultaneously and highly selective may suppress virology, purulent and fungi infections. One of main pedologic and ecologic issues is to search for preparations protecting vegetable culture against pathogenic microorganisms. The current protective agents cannot completely prevent spreading viral and fungal infections. To find a biologically active preparation against pathogenic microorganisms of vegetable cultures, a range of experiments with one

of polyene antibiotics has taken place in hothouse facilities and open soils of vegetable farms located within the territory of the Apsheron peninsula, where vegetable cultures such as cucumber, tomato, eggplant and pepper are cultivated. "Infanvir", the biologically active preparation developed in the pedology faculty of Baku State University (the preparation content is not disclosed due to the patent consideration) against virus and fungal infections of vegetable cultures has been tested for the first time.

1. The "Infanvir" preparation has been developed on the basis of membrane-active macrolide antibiotics. The mechanism of action of such compounds is based on structural channels of molecular size generated by them in cell membranes and which are selectively permeable for ions and organic compounds.

2. The investigations carried out in hothouse facilities as well as in open soils have demonstrated high efficiency of the "Infanvir" preparation with respect to pathogenic microorganisms.

3. The treatment of plants and soil itself affected by virus (the Tobacco mosaic virus) and fungal infections by spraying the affected areas subject to calculation 100 ml initial solution dissolved in 10 l water at [22].

REFERENCES

1. Borowski E. Novel approaches in the rational design of antifungal agents of low toxicity (2000) *Farmaco*, v. 55, p. 206-208.
2. Aszalos A, Bax A, Burlinson N., Roller P, McNeal C (1985) Physico-chemical and microbiological comparison of nystatin, amphotericin A and amphotericin B, and structure of amphotericin A. *J Antibiot (Tokyo)* 38: 1699-1713.
3. Baginski M., Czub J. (2009) Amphotericin B and Its New Derivatives - Mode of Action. *Current Drug Metabolism*, v. 10, pp. 459-469.
4. Ciesielski F, Griffin DC, Loraine J, Rittig M, Delves-Broughton J, Bonev BB (2016) Recognition of membrane sterols by polyene antibiotics amphotericin B and natamycin, A ¹³C MAS NMR study. *Frontiers in Cell and Developmental Biology* 14, Article 57: 1-12.
5. Cohen BE (2010) Amphotericin B Membrane Action: role for two types of ion channels in eliciting cell survival and lethal effects. *J Membrane Biol* 238: 1-20.
6. De Marie S, Janknegt R, Bakker-Woudenberg IAJ (1994) Clinical use of liposomal and lipid-complexed amphotericin B. *J Antimicrob Chemother* 33: 907-916.
7. Vafa Kh, Qasimova, Gulnara H, Sultanova, Arifa A, Samedova, Tahmina P, Tagi-zade, Turkan J, Pashazade, Khalil M, Kasumov. 2018. Development of the Method to Enhancing the Biological Activity of Polyene Antibiotics and its Use for Environmental Improvement. *J. Chemical Ecology*, Elsever publishing (in press).
8. Gray KC, Palacios DS, Dailey I, Endo MM, Uno BE, Wilcock BC, Burke MD (2012) Amphotericin primarily kills yeast by simply binding ergosterol. *Proc Natl Acad Sci USA* 109: 2234-2239.
9. Ibragimova VKh, Aliev DI, Alieva IN (2002) Biophysical and medicobiological aspects of application of polyene antibiotics in combination with dimethyl sulfoxide. *Biophysics* 47: 774-781.
10. Ibragimova V, Alieva I, Kasumov Kh, Khutorsky V (2006) Transient permeability induced by alkyl derivatives of amphotericin B in lipid membranes. *Biochim Biophys Acta* 1758: 29-37.
11. Ibragimova VKh, Samedova AA, Sultanova GG, Gasimov KhM (2014) The antiviral and antifungal action of INFANVIR antibiotic at the vegetable crops. The First European Conference on Biology. Section 2. Physico-chemical Biology and Medical Sciences, Austria, Vienna: 45-50.

12. Kasumov KhM (2009) Structure and membrane function of polyene macrolide antibiotics. Monograph, Moscow «Nauka»: 1-512.
13. Mamidi A, DeSimone JA, Pomerantz RJ (2002). Central nervous system infections in individuals with HIV-1 infection. *J Neurovirol* 8: 158-167.
14. Récamier KS, Hernández-Gómez A, González-Damián J, Ortega-Blake I (2010) Effect of membrane structure on the action of polyenes: I. Nystatin action in cholesterol- and ergosterol-containing membranes. *Journal of Membrane Biology* 237: 31-40.
15. Samedova AA, Tagi-zade TP, Kasumov KhM (2018) Dependence of ion channel properties formed by polyene antibiotics molecules on the lactone ring structure. *J Bioorganic Chemistry*, 2018, Vol. 44, No. 3, pp. 337–345.
16. Sepkowitz KA (2002) Opportunistic infections in patients with and patients without Acquired Immunodeficiency Syndrome. *Clin Infect Dis* 34: 1098-1107.
17. Vaisman II, Berkowitz ML (1992). Local structural order and molecular associations in water-DMSO mixtures. Molecular dynamics study. *Am Chem Soc* 114: 7889-7896.
18. Yu Z, Quinn P (1994) Dimethyl sulphoxide: a review of its applications in cell biology. *Bioscience Reports* 14: 259-281.
19. Zotchev S.B. Biosynthesis of natural products applied to drug discovery. *Curr. Top. Med. Chem.*, 2008, v. 8, pp. 616-617.
20. Qasimova V.Kh., Sultanova G.G., Baghirova A.A., Tagizade T.P., Pasha-zade T.J., Kasumov Kh.M. 2018. Development of the method to Enchancing of Biological Activity of Polyene Antibiotics and its Use in Environmental Improvement. *J. Chemical Ecology* (in press).
21. Lewis J., Papavizas J. Biological control of plant diseases. *Soil Biology Biochem.*, 1987, v. 191(2), p. 114.
22. Guliyeva E.A., Jalaladdinov F.F., Asgerova T.Y., Haqverdiyeva T.M. (2022) Synthesis of Cu (II), Ni (II), Co (II) complexes with hydrazide of maleic acid. International scientific and practical conference “Cutting EDGE-Science”. Shawnee, USA. pp. 82-84. DOI:10.5281/zenodo.509167

В.Х. Касимова, Ф.В. Гасанли, Л.Р. Керімова, Т.А. Холіна
ЗНАЧЕННЯ ПОЛІСНОВИХ АНТИБІОТИКІВ У ПІДВИЩЕННІ
ПРОНИКНОСТІ МЕМБРАНТА В ЛІКУВАННІ ІНФЕКЦІЙ ТВАРИН І РОСЛИН

Анотація. Показано, що використання полісенових антибіотиків (ПА) у поєднанні з диметилсульфоксидом різко підвищує іонну проникність мембран та біологічну активність антибіотиків. Розглянуто порівняльні фізичні та хімічні характеристики диметилсульфоксиду та ПА. Досліджено вплив комплексної взаємодії ПА на двошарові ліпідні мембрани (БЛМ). Методом визначення параметрів біологічної активності ПА було показано, що з усіх найбільш вивчених ПА найефективнішими виявилися амфотерицин В та леворин. Результати розпочато відповідно до провідності холестерину в мембранах за допомогою БЛМ. На основі ПА розроблено екологічну модель захисту навколишнього середовища шляхом встановлення мембранно-активної концентрації ПА проти вірусних, грибкових та бактеріальних інфекцій для тварин та рослин. Було показано, що використання полісенових антибіотиків (ПА) у поєднанні з диметилсульфоксидом (ДМСО) різко підвищує іонну проникність мембран та біологічну активність антибіотиків. Визначено порівняльні фізичні та хімічні характеристики диметилсульфоксиду та ПА. Досліджено вплив комплексного зв'язку між ПА та двошаровими ліпідними мембранами (БЛМ). Визначено параметри біологічної активності ПА та БЛМ. Було показано, що серед усіх досліджених ПА найефективнішими були амфотерицин В та леворин. Показано, що іонна проникність ВЛМ залежить від концентрацій амфотерицину В, леворину та холестерину. На основі ПА розроблено біологічно активні препарати проти вірусних, бактеріальних та грибкових захворювань. Було показано, що використаний препарат може повністю запобігати росту вірусу тютюнової мозаїки. Слід особливо зазначити, що після

обробки препаратом «Інфанвір» уражені рослини не тільки виліковуються, а й повністю регенеруються. Більше того, овочеві рослини, оброблені таким препаратом, мали в 2 рази більший урожай, ніж контрольні. Вважається, що антивірусний та протигрибковий ефект препарату «Інфанвір» пов'язаний з їх взаємодією з ліпідними компонентами цитоплазматичних мембран, що викликає руйнування структури клітин патогенних мікроорганізмів.

Ключові слова: полієнові антибіотики, диметилсульфоксид, амфотерицин В, леворин, ліпідні мембрани, проникність мембран, інфекції тварин та рослин.

Стаття надійшла до редакції 10.12.25, надійшла після рецензування 27.01.26, прийнята 26.02.26

The article was received 10.12.25, received after revision 27.01.26, accepted 26.02.26

Вафа Халіл Касимова

доктор біотехнологічних наук, викладач, Бакинський державний університет

Адреса робоча: З. Халілова, 23, Баку, Азербайджан AZ1148

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-3305-8450> **e-mail:** vafaxal@outlook.com

Фаріда Вакіф Гасанли

аспірант, викладач, Мінгачевірський державний університет, Мінгачевір, Азербайджан

Адреса робоча: Д. Алієва, 21, Мінгачевір, Азербайджан AZ-4500

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-7929-4326> **e-mail:** feridahasanli@gmail.com

Лейлі Рашид Керімова

канд. біол. наук, викладач, Бакинський державний університет

Адреса робоча: З. Халілова, 23, Баку, Азербайджан AZ1148

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-5950-9543> **e-mail:** leylikarimova@bsu.edu.az

Тетяна Олександрівна Холіна

канд. біол. наук, викладач, Бакинський державний університет

Адреса робоча: З. Халілова, 23, Баку, Азербайджан AZ1148

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-1098-9369> **e-mail:** tatyanaxolina2302@gmail.com

УДК 692.5:338.242.2:502.131.1

Roman Hlushchenko, Doctor of Philosophy, Assistant Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2863-1480> **e-mail:** gr2017inc@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

CHALLENGES OF GREEN CONSTRUCTION IN UKRAINE AT THE STAGES OF REGULATORY IMPLEMENTATION AND PRACTICAL REALIZATION

***Abstract.** The article examines the current state and prospects of green building development in Ukraine in the context of international experience and economic incentive mechanisms. The study highlights the growing importance of environmentally oriented construction as a response to the challenges of climate change, urban environmental degradation, increasing energy dependence and the need for sustainable urban transformation. Unlike EU countries, where LEED, BREEAM and national sustainability standards are supported by financial incentives such as tax benefits, subsidized loans, grant programmes and fast-track permitting procedures, Ukraine lacks a comprehensive system of state support. This absence makes green projects economically less attractive than traditional construction, extends payback periods and reduces investor interest.*

The article presents a comparative analysis of incentive models implemented in Copenhagen, Berlin, Warsaw and London and includes an applied economic modelling case for a 10,000–25,000 m² development in Kyiv. The modelling results show that the implementation of grants, reduced-interest financing and tax reductions may shorten the investment payback period from 13 to 8–9 years and significantly increase project profitability. Based on international practices adapted to Ukrainian conditions, the paper proposes a set of economic and regulatory mechanisms, including tax reductions, concessional lending, land and planning incentives, and the introduction of a national certification standard and the “Green Fast Track” system. The study concludes that green construction should be regarded not as an additional financial burden, but as an economically justified tool for enhancing competitiveness, improving environmental performance and accelerating post-war recovery. A systemic state policy can enable Ukraine to increase the share of certified green projects to 10–15% within five years and integrate into the European sustainable development framework.

Keywords: green building; sustainable development; LEED; BREEAM; economic incentives; energy efficiency; real estate development; public policy; ESG; Ukraine; CAPEX; payback period; investment attractiveness.

© Р.О. Глущенко, 2026

Р.О. Глущенко

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

ПРОБЛЕМИ «ЗЕЛЕНОГО» БУДІВНИЦТВА В УКРАЇНІ НА СТАДІЯХ НОРМАТИВНОЇ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ ТА ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

***Анотація.** Стаття присвячена аналізу сучасного стану та перспектив розвитку «зеленого» будівництва в Україні у контексті міжнародного досвіду та практики економічного стимулювання. Обґрунтовано актуальність переходу до екологічно орієнтованих технологій у будівельній галузі з огляду на зростання енергетичної залежності, екологічну деградацію урбанізованих територій та необхідність формування стійких міських екосистем. Показано, що на відміну від провідних європейських країн, де сертифікація LEED, BREEAM та національні стандарти супроводжуються системою податкових пільг, грантів та спрощених процедур, в Україні відсутні ефективні механізми державного стимулювання. Це робить «зелені» проекти економічно менш вигідними для девелоперів порівняно з традиційним будівництвом, збільшує строк окупності та обмежує їх поширення. У статті здійснено порівняльний аналіз економічних моделей Копенгагена, Берліна, Варшави та Лондона й проведено розрахункове моделювання для офісного проєкту в Києві, що доводить ключовий вплив фінансових стимулів на окупність інвестицій. Показано, що введення грантів, здешевленого кредитування та податкових пільг здатне скоротити строк окупності з 13 до 8–9 років та підвищити інвестиційну привабливість. Запропоновано комплексні механізми стимулювання, включаючи податкові інструменти, пільгове кредитування, систему «Green Fast Track» та поетапну дорожню карту імплементації. Зроблено висновок, що розвиток зеленого будівництва в Україні можливий лише за умови переходу від декларативної політики до економічно обґрунтованої системи підтримки, що забезпечить інтеграцію країни у європейський ринок сталого розвитку.*

***Ключові слова:** зелене будівництво; сталий розвиток; LEED; BREEAM; економічні стимули; енергоефективність; розвиток нерухомості; державна політика; ESG; Україна; капітальні витрати; термін окупності; інвестиційна привабливість.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.79-94>

Вступ

У контексті глобальних кліматичних змін, зростання енергетичної нестабільності та поглиблення екологічної кризи питання сталого та «зеленого» будівництва набуває ключового значення. Сучасні мегаполіси стикаються з нарощуванням теплового ефекту «острова», забрудненням повітря, деградацією зелених зон і дефіцитом водних ресурсів. Обмеженість природних ресурсів – води, чистого повітря, енергії та безпечного довкілля – вимагає переходу від моделі споживання як “даності” до моделі відповідального використання, де кожне інфраструктурне рішення має враховувати вплив на навколишнє середовище та здоров’я населення. Розраховувати, що ресурси, доступні сьогодні, залишатимуться у майбутньому, – стратегічно помилково та економічно небезпечно.

У світі державна політика дедалі частіше спрямована на підтримку будівельних проєктів, що забезпечують раціональне використання ресурсів та зменшення техногенного навантаження. Податкові пільги, знижені ставки на підключення до інженерних мереж, прискорені дозвільні процедури та субсидування «зелених» технологій роблять екологічне будівництво економічно доцільним і конкурентоспроможним [1].

В Україні, попри присутність міжнародних сертифікаційних систем LEED та BREEAM, ринок зеленого будівництва перебуває на початковій стадії розвитку і не має реальних економічних стимулів. Сертифікація часто використовується як маркетинговий інструмент для підвищення вартості та швидкості продажу, а основні вигоди проявляються лише на етапі експлуатації через економію енергоресурсів [2]. Відсутність державних стимулів – знижок на земельні ділянки, податкових переваг, компенсацій за впровадження екологічних технологій та спрощених дозвільних процедур – робить екологічні рішення фінансово не вигідними на етапах проєктування та будівництва.

У результаті девелопери обирають стандартні будівельні рішення, оскільки вони забезпечують швидший економічний ефект, тоді як «зелені» проєкти часто поступаються за показниками інвестиційної привабливості. Це створює розрив між задекларованими цілями сталого розвитку та реальною практикою галузі.

Мета статті – продемонструвати недостатність та неефективність чинної нормативно-правової та економічної бази будівельної галузі України, яка стимулює девелоперів до вибору стандартних технологій замість впровадження «зелених» рішень, а також обґрунтувати необхідність впровадження економічних стимулів для розвитку сталого будівництва.

Завдання статті:

- проаналізувати чинну нормативну та економічну базу будівництва в Україні;
- визначити ключові фактори, що роблять стандартні технології економічно вигіднішими за «зелені»;
- дослідити існуючу практику сертифікації в Україні (LEED/BREEAM) та її реальний вплив;
- провести порівняння з європейською моделлю стимулювання (на прикладі Польщі);
- запропонувати економічні механізми стимулювання «зелених» проєктів.

1. Теоретичні засади та міжнародний досвід розвитку «зеленого» будівництва

1.1. Теоретичні засади сталого та «зеленого» будівництва

«Зелене» будівництво розглядається як комплексний підхід до проєктування, реалізації та експлуатації будівель з мінімальним впливом на довкілля, раціональним використанням ресурсів та забезпеченням високої якості життя населення. Основними параметрами є енергоефективність, водозбереження, інтеграція екосистем у міське середовище, зниження вуглецевих викидів та застосування екологічних матеріалів [10].

Проте міжнародні дослідження свідчать, що сама по собі сертифікація LEED чи BREEAM не гарантує суттєвого зниження екологічного впливу, якщо відсутні відповідні економічні та законодавчі стимули [12]. Сертифікація лише фіксує відповідність технічним критеріям і не змінює ринкових умов, що визначають економічну мотивацію девелопера [15].

У країнах ЄС успіх сталого будівництва забезпечується поєднанням нормативних вимог та економічних інструментів. Девелопери отримують значні вигоди – податкові стимули, пільгове кредитування, прискорені дозвільні процедури, державні гранти на енергоефективні технології [16]. Це робить «зелені» рішення економічно вигіднішими за традиційні.

В Україні ж LEED/BREEAM мають переважно маркетинговий характер, оскільки відсутні будь-які механізми компенсації витрат, преференції щодо землі, фінансування чи податкові пільги, а тому екологічні проєкти втрачають конкурентну економіку.

1.2. Міжнародний досвід стимулювання екологічного будівництва

Світова практика підтверджує, що розвиток сталого будівництва можливий лише при державній підтримці економічних стимулів [12]. Нижче наведено приклади чотирьох європейських столиць (Табл. 1.2.1), де узагальнено типи економічних заходів та їх основні результати в практиці кожного міста.

Таблиця 1.2.1. Порівняльна характеристика інструментів стимулювання у чотирьох європейських столицях

Місто	Інструменти стимулювання	Результати / вплив
Копенгаген, Данія	пріоритетне виділення землі, гранти на екотехнології, пільгове фінансування муніципальних "green bonds"	реалізація проєктів на кшталт <i>CopenHill</i> , реконфігурація енергетичної системи міста, стратегія СРН2025 щодо zero-carbon
Лондон, Велика Британія	fast-track planning, податкове зниження, Carbon Offset mechanism, BREEAM як критерій містобудування	зростання ринкової вартості «зелених» об'єктів та скорочення інвестиційного циклу
Берлін, Німеччина	пільгове кредитування KfW (1–1,5% річних), bonus-graument до 27,5%	скорочення строку окупності на 20–30%
Варшава, Польща	EU-funds, компенсація CAPEX до 30%, програми NFOŚiGW	масове зростання сертифікованих об'єктів, активний попит інвесторів
Київ, Україна	добровільна сертифікація без стимулів	сертифікація як маркетинг, без економічного ефекту

У європейських столицях поєднуються різні інструменти – від прямого фінансування до процедурних преференцій – що робить green-проєкти економічно привабливими. Українська практика відрізняється відсутністю комплексних стимулів.

Дані підтверджують, що економічна мотивація є ключовим драйвером розвитку, а не лише екологічна ідеологія або імідж.

1.3. Практичні кейси стимулювання «зелених» проєктів у європейських містах

Копенгаген (Данія). Копенгаген є одним з лідерів у впровадженні стратегії carbon-neutral City 2025, де екологічні технології підтримуються державними інструментами фінансування. Одним з ключових об'єктів є *CopenHill* – інфраструктурний комплекс утилізації відходів і виробництва тепла та електроенергії, що забезпечує енергопостачанням десятки тисяч домогосподарств [23].

Лондон (Велика Британія). Система містобудівної політики включає економічні стимули: швидше отримання дозволів, компенсаційні механізми CO₂ та фінансові переваги для девелопера за наявності BREEAM Outstanding [16].

Берлін (Німеччина). Федеральний банк KfW забезпечує пільгові кредити та часткове погашення інвестицій на реалізацію енергоефективних об'єктів, що в окремих випадках скорочує строк окупності з 12–18 до 3–6 років [12].

Варшава (Польща). «Зелені» проєкти реалізуються завдяки комбінованому фінансуванню із структурних фондів ЄС, муніципальних програм та податкових знижок, що забезпечує конкурентність сертифікованих об'єктів [16].

Київ (Україна). Сертифікація LEED/BREEAM використовується як маркетинговий інструмент і не має економічних стимулів, що обмежує розвиток екологічно орієнтованих будівель.

Висновки до розділу 1

Аналіз міжнародного досвіду свідчить, що масовий розвиток «зеленого» будівництва можливий лише при наявності економічних стимулів. У європейських містах зелений проєкт є фінансово вигіднішим за стандартний/стаціонарний, тоді як в Україні – економічно збитковим. Відсутність системи підтримки девелопера формує бар'єр, що гальмує впровадження екологічних технологій.

2. Проблеми та бар'єри «зеленого» будівництва в Україні

2.1. Відсутність нормативної та податкової бази стимулювання «зеленого» будівництва в Україні

Ключовим бар'єром розвитку «зеленого» будівництва в Україні є відсутність цілісної державної політики та економічних стимулів, здатних зробити екологічні інвестиції фінансово вигідними. На відміну від країн Європейського Союзу, де уряди забезпечують потужну підтримку через податкові пільги, concessional-loans, грантові програми та спрощені дозвільні процедури, в Україні такі механізми відсутні або не забезпечують реального впливу на рішення девелоперів [16], [17].

Станом на 2025 рік українське законодавство не містить ані податкових стимулів, ані муніципальних програм підтримки для об'єктів, сертифікованих за LEED або BREEAM [17]. Навіть за умови наявності технічної можливості впровадження ресурсозберігаючих технологій, девелопери вимушені орієнтуватися на швидкий оборот капіталу, оскільки додаткові інвестиції в екологічні рішення не компенсуються жодними фінансовими вигодами.

Для порівняння: у Польщі, Данії та Німеччині грантові програми й субсидоване фінансування дозволяють знизити чисті капітальні витрати від 20% до 30%, а також скоротити вартість кредитування до 1–6% річних [1], [5], [6], [12]. В Україні ж бізнес залучає комерційні кредити під 18–25% річних, що робить довгострокові екологічні інвестиції економічно недоцільними [16].

У результаті «зелені» сертифікації LEED/BREEAM виконують переважно маркетингову функцію, підвищуючи комерційну привабливість об'єктів, але не сприяють системним змінам у галузі та зниженню реальних екологічних ризиків.

2.2. Порівняльний аналіз податкових та фінансових інструментів стимулювання (Європа – Україна)

Для порівняння ефективності міжнародних систем екологічної сертифікації у будівництві проведено аналіз структурних відмінностей, ключових критеріїв та результативності найпоширеніших стандартів – LEED, BREEAM та DGNB, подано їх узагальнену характеристику, що дозволяє оцінити сильні сторони та обмеження кожної системи у контексті проектування та експлуатації будівель (Табл. 2.2.1).

Таблиця 2.2.1. Фіскальні ставки (орієнтири для порівняння)

Країна	ПДВ / VAT	Корпоративний податок (CIT)
Польща	23% (Dudkowiak & Putyra)	19% (Tax Summaries, 2024)
Німеччина	19% (Tax Summaries, 2024)	25% середньозважено (GTAI, 2023)
Данія	25% (Tax Foundation, 2024)	22% (OECD, 2024)
Велика Британія	20% (GOV.UK, 2024)	25% (GOV.UK, 2024)
Україна	20% (State Tax Service, 2025)	змінні режими (Accace, 2024)

Дані, що наводяться, показують приблизні значення ПДВ та корпоративного податку у країнах, використаних для порівняння. Значення використовуються у подальших моделях для розрахунку впливу податкових режимів на CAPEX/OPEX та окупність.

Відмінності у фіскальних ставках впливають на загальну інвестиційну привабливість: краще податкове середовище у Польщі чи Данії посилює стимул для впровадження «зелених» рішень.

Для оцінки інституційних відмінностей між Україною та країнами ЄС доцільно порівняти ключові економічні та податкові параметри, що визначають інвестиційну логіку девелоперів під час прийняття рішень щодо впровадження «зелених» технологій. Насамперед важливими є ставки ПДВ та корпоративного податку, наявність або відсутність грантових механізмів, доступ до пільгового кредитування та муніципальних стимулів, які формують фінансові умови реалізації проектів.

У країнах Європейського Союзу податкова та фінансова політика спрямована на зниження капітальних витрат (CAPEX) і вартості грошей у часі (WACC), що підвищує інвестиційну привабливість екологічно-орієнтованих будівель. В Україні такі механізми відсутні або не мають масштабного практичного застосування, що суттєво погіршує економічні параметри «зеленого» будівництва.

Порівняльна матриця податкових та фінансових інструментів для стимулювання green-проектів у країнах ЄС та Україні (Табл. 2.2.2) демонструє принципи відмінності між державними моделями підтримки та пояснює, чому аналогічні проекти мають різні показники окупності у різних країнах.

Наявність грантів, якими супроводжуються пільгові позики та земельні преференції у досліджуваних країнах, наведено у Табл. 2.2.2.

Таблиця 2.2.2. Policy-matrix: використання інструментів стимулювання у вибраних країнах

Інструмент	Данія / CPH	Німеччина / KfW	Польща / NFOŚiGW	Лондон (UK)	Україна
Гранти	великі green-funds (up to €1.8B) (Ministry of Finance Denmark, 2024)	repayment bonus до 27.5% (KfW, 2023)	CAPEX-гранти до 30% (NFOŚiGW, 2023)	targeted grants (Business Green, 2024)	відсутні
Пільгові кредити	RRP-financing	1–1.5% loans (KfW, 2023)	5–6% loans	green-loans	18–25% комерційні (Assace, 2024)
Земельні преференції	наявні	обмежено	активні	planning об'єкчення	відсутні

Саме поєднання грантів та дешевих кредитів суттєво знижує чисті додаткові CAPEX у «зелених» проєктах.

2.3. Моделі капітальних витрат і окупності (Київ – Варшава)

Аналіз практичного застосування екологічних стандартів у країнах ЄС показав значний економічний ефект від впровадження державних стимулів та муніципальної підтримки, наведено узагальнені приклади реалізованих green-проектів, що демонструють взаємозв'язок між інструментами стимулювання, витратами та строками окупності (Табл. 2.3.1).

Таблиця 2.3.1. Розрахунок EXTRA-CAPEX

Параметр	Київ	Варшава
Extra CAPEX	€1 500 000	€1 950 000
Грант	0%	25%
Net extra CAPEX	€1 500 000	€1 462 500

Порівняння підтверджує, що грантові підтримки у Варшаві майже компенсують вищу базову вартість green-CAPEX, наближаючи Net extra CAPEX до рівня Києва.

Річна економія у витратах на енергію при впровадженні енергоефективних заходів на основі baseline OPEX та очікуваний процент економії наведено у Табл. 2.3.2.

Таблиця 2.3.2. Розрахунок економії OPEX

	Київ	Варшава
Annual savings	€105 000	€120 000

Показники річної економії є ключовим компонентом у формулі простого строку окупності.

Узагальнено обчислені прості строки окупності для Києва й Варшави в базовому сценарії та за умов пільгового кредитування (Табл. 2.3.3).

Таблиця 2.3.3. Окупність проекту

	Київ	Варшава
Окупність	14.2 років	12.1 років (8–10 з пільговим кредитом)

Окупність у Києві (>14 років) робить проект інвестиційно неприйнятним для традиційних девелоперів; у Варшаві – підвищена привабливість завдяки пільгам.

Економічна різниця формується не технологіями, а політикою стимулювання [5], [6].

2.4. Порівняння ефективності: офісна vs. житлова будівля

Порівняння двох типів проектів (офіс 25 000 м², житловий 15 000 м²) демонструє, як тип об'єкта впливає на строк окупності та показники NPV/IRR (Табл. 2.4.1).

Таблиця 2.4.1. Розрахунок економії OPEX

Показник	Варшава	Київ
Офіс 25 000 м ²	7.3 року	10.5 року
Житловий 15 000 м ²	4.6 року	7.8 року
NPV	+€2.8 млн	-€0.41 млн
IRR	10.2%	9.1%

Житлові проекти зазвичай мають коротший строк окупності через нижчі CAPEX на м² і стабільніший попит, що видно з розрахунків.

Висновки до розділу 2

«Зелений» проект у ЄС стає фінансово вигідним завдяки системі економічних стимулів. В Україні за відсутності механізмів підтримки green-стандарту залишаються маркетинговим інструментом, а не драйвером системних змін, натомість, програма пільг економічного блоку сприяє збільшенню проектів на основі «зелених» технологій.

3. Пропозиції щодо формування ефективної системи стимулів для зеленого будівництва в Україні

3.1. Концепція національної системи стимулювання «зеленого» будівництва в Україні

На основі результатів порівняльного аналізу (розділ 2) встановлено, що ключовим фактором успішного розвитку «зеленого» будівництва є не технологічний рівень галузі чи наявність фахівців, а фінансові та податкові стимули, які створюють економічну перевагу енергоефективних рішень над традиційними. У країнах Європейського Союзу такі стимули забезпечують скорочення періоду окупності інвестицій та зниження ризиків проектної діяльності, що підтверджується результатами моделювання для Києва та Варшави.

В Україні відсутня цілісна система економічного стимулювання, тому впровадження екотехнологій залишається фінансово не вигідним та використовується переважно як маркетинговий інструмент. Отже, розвиток галузі потребує структурних реформ та впровадження комплексної системи підтримки.

3.2. Спрощення дозвільних процедур

Пропонується запровадження комбінованої моделі державної підтримки зеленого будівництва, що включає податкові, фінансові та регуляторні інструменти. Процедурні стимули є важливим елементом успішної європейської практики. Запровадження прискореної системи дозволить істотно скоротити ризики та інвестиційний цикл. Основні елементи:

- скорочення строків погодження проектної документації на 30–40%;
- створення єдиного цифрового вікна для екологічних проєктів;
- попередня екологічна експертиза замість багаторівневих дозволів;
- застосування автоматичного пріоритету при наявності підтверджених екологічних критеріїв.

3.3. Податкові стимули

Для оцінки впливу стимулів на економіку green-проєктів було реалізовано умовну економічну модель. Представлено порівняння (Табл. 3.3.1) ключових інвестиційних та експлуатаційних параметрів будівлі в сценаріях без стимулів та зі стимулами, що дозволяє оцінити реальні переваги підтримки сталого будівництва.

Таблиця 3.3.1. Податкові стимули, порівняння поточного стану та пропозицій

Інструмент	Поточний стан	Пропозиція	Очікуваний результат
Податок на прибуток підприємств	18%	9% для об'єктів із сертифікацією BREEAM Very Good / LEED Gold	Скорочення строку окупності на 2–3 роки
ПДВ на обладнання для енергоефективності	20%	Звільнення або ставка 7%	Зменшення CAPEX на 6–8%
Земельний податок	1–3% НГО	0,3% на перші 10 років	Стимул використання brownfield

Запропоновані зміни в податкових інструментах (СІТ, ПДВ, земельний податок) і очікувані ефекти на окупність мають безпосередній вплив на зменшення Net extra CAPEX, що підвищує привабливість green-проектів.

3.4. Фінансові інструменти

Таблиця підсумовує пропозиції щодо green-фінансування, грантів і амортизації та їх очікуваний ефект.

Таблиця 3.4.1. Фінансові стимули

Інструмент	Поточний стан	Пропозиція	Ефект
Кредитування	18–22%	«Green Financing Fund»: 5–7%	Зниження WACC та скорочення окупності
Державні гранти	відсутні	10–15% компенсація інженерних систем	Підвищення інвестиційної привабливості
Прискорена амортизація	немає	5 років для теплових насосів, рекуперації, PV	Прискорення повернення вкладень

Дешевші кредити і гранти найсильніше впливають на зниження WACC та строку окупності.

3.5. Урбаністичні стимули

Таблиця перелічує містобудівні механізми (коефіцієнт забудови, швидкі дозвільні процедури, земельні преференції).

Таблиця 3.5.1. Урбаністичні стимули, механізми та очікувані ефекти

Інструмент	Суть	Очікуваний ефект
+15–20% до коефіцієнта забудови	Бонусна площа за зеленість	Реальний фінансовий мотив для девелопера
Пріоритетне погодження дозвільних документів	Прискорення на 30–50%	Скорочення строків реалізації
Пільгове виділення земельних ділянок	Для містоутворюючих проектів	Приватні інвестиції в інфраструктуру

Урбаністичні бонуси (додаткова площа) мають негайний фінансовий ефект для девелопера, що часто критично для прийняття рішення.

3.6. Очікуваний макроекономічний ефект

- ↑ +2–3 млрд дол. інвестицій щороку
- ↓ –30–45% енергоспоживання будівель
- ↓ –12% викидів CO₂ у секторі будівництва за 10 років
- ↑ +10–18% зростання ринкової вартості нерухомості
- ↑ Підвищення конкурентоспроможності українських міст до рівня ЄС.

3.7. Економічна модель впливу державних стимулів

Таблиця показує очікувану зміну CAPEX/OPEX, строку окупності та IRR при введенні пакета стимулів.

Таблиця 3.7.1. Порівняння результатів стимулювань

Параметр	Без стимулів	Зі стимулами
CAPEX	100%	92%
OPEX	100%	70%
Строк окупності	13 років	8–9 років
IRR	6–7%	11–13%

Підтверджує, що пакет стимулів може суттєво покращити економічні показники проекту.

3.8. Національна система сертифікації (USCS)

Пропонується створити **Ukrainian Sustainable Construction Standard (USCS)** – еквівалент LEED/BREEAM, заснований на вимогах EPBD, ESG, LCA. Ключова відмінність – отримані бали автоматично конвертуються у податкові або фінансові пільги. Переваги:

- зменшення залежності від маркетингової сертифікації,
- прозорість критеріїв,
- прогнозованість рішень для інвесторів.

Висновки до розділу 3

Навіть базове моделювання підтверджує, що державні стимули здатні зменшити строк окупності проекту майже вдвічі та підвищити його інвестиційну привабливість до рівня європейських ринків, де подібні інструменти вже активно застосовуються.

4. Рекомендації та пропозиції щодо реформування політики стимулювання «зеленого» будівництва в Україні

4.1. Формування нормативно-правової бази стимулювання зеленого будівництва

На основі порівняльного аналізу практик країн ЄС доведено, що розвиток «зеленого» будівництва можливий лише за наявності системи законодавчо закріплених економічних стимулів, які зменшують фінансові ризики девелоперів та скорочують строк окупності інвестицій [10], [17]. В Україні ж наразі відсутні як податкові пільги, так і механізми пріоритетного доступу до земельних ділянок, пільгового кредитування та грантових програм [16].

З метою формування умов рівної конкуренції між традиційними та екологічними технологіями пропонується:

- внести зміни до Податкового кодексу України щодо запровадження податкових знижок для сертифікованих проєктів;

- визначити державний порядок сертифікації green-об'єктів;
- запровадити прискорену амортизацію енергоефективного обладнання та інженерних систем.

Такі механізми широко використовуються в ЄС та довели ефективність у підвищенні економічної життєздатності green-проектів [8], [22].

4.2. Фінансові інструменти підтримки інвесторів та девелоперів

Створення національної системи фінансової підтримки (табл. 4.2.1) дозволить скоротити строк окупності інвестицій з 12–15 років до 6–9 років, що відповідає європейському досвіду [9], [10].

Таблиця 4.2.1. Порівняння інструментів фінансової підтримки

Інструмент	Поточний стан	Пропозиція	Очікуваний результат
Податок на прибуток підприємств	18%	9% для проектів з сертифікацією BREEAM/LEED (≥Very Good/Gold)	Скорочення строку окупності на 2–3 роки
ПДВ на енергоефективне обладнання	20%	звільнення або ставка 7%	зменшення CAPEX на 6–8%
Земельний податок	1–3%	0,3% на перші 10 років	стимул переробки brownfield
Кредитування	18–22%	5–7% через państwowe субсидування	зниження WACC та ризиків
Державні гранти	немає	10–15% компенсації green-CAPEX	підвищення інвестиційної привабливості

4.3. Спрощення адміністративних процедур

Запровадження fast-track дозволить скоротити тривалість реалізації проектів на 30–50%, що в Європі вважається одним із ключових інструментів стимулювання [24].

Пропонується:

- механізм «Green Fast Track» для екологічних об'єктів;
- єдине цифрове вікно погодження;
- екологічне оцінювання проекту замість множинних процедур.

4.4. Інтеграція національної та міжнародної систем сертифікації

Для прозорості та інвестиційної привабливості пропонується створити:

- **Ukrainian Sustainable Construction Standard (USCS)** – український аналог LEED/BREEAM;
- механізм автоматичного надання стимулів за отримані бали ESG/LCA.

Це дозволить інтегрувати український ринок у загальноєвропейський [2].

4.5. Соціально-екологічний ефект і довгострокові результати

Очікуваний результат впровадження пакетних стимулів (Табл. 4.5.1):

Таблиця 4.5.1. Очікувані показники після впровадження стимулів

Показник	Стан	Потенційний результат
Середній строк окупності	12–15 років	6–8 років
Питомі викиди CO ₂	базовий рівень	–25–40%
Частка green-building на ринку	<2%	10–15% за 5 років
Економія енергоресурсів	незначна	до 30–40%
Інвестиційна привабливість	низька	суттєве зростання

4.6. Дорожня карта впровадження реформи

Формування ефективної системи стимулювання зеленого будівництва неможливе без поетапного та вимірюваного механізму впровадження, який містить чіткі цілі, відповідальних учасників процесу та очікувані результати. Для забезпечення прогнозованості інвестиційного середовища та можливості масштабування необхідно визначити послідовність ключових кроків впровадження фінансових, податкових та регуляторних інструментів підтримки.

Запропонована дорожня карта дозволяє узгодити інтереси держави, муніципалітетів, девелоперів та фінансових інституцій, а також забезпечує моніторинг результативності на кожному етапі реалізації політики. Вона охоплює чотири основні фази – підготовчу, пілотну, законодавчу та фазу повної імплементації, що відповідає міжнародній практиці переходу від локальних тестових проєктів до національних програм стимулювання.

Для узагальнення запропонованого підходу подано структурований план заходів, що включає перелік ключових дій, відповідальних сторін та орієнтовні строки виконання (Табл. 4.6.1).

Таблиця 4.6.1. Дорожня карта: етапи, відповідальні, строки

Етап	Дії	Відповідальні	Термін
Підготовчий	розробка пакету стимулів	Мінрегіон, Мінфін	2025–2026
Пілотні проєкти	3–5 проєктів в містах	девелопери, банки	2026–2027
Масштабування	законодавче закріплення	Верховна Рада	2027–2028
Повна імплементація	нац. моніторинг і корекція	уряд, муніципалітети	2028–2030

Реалізація зазначеної дорожньої карти дозволить сформувати прогнозований інноваційний ринок, зменшити інвестиційні ризики та забезпечити масштабування green-будівництва на національному рівні, що є критично необхідним для післявоєнної реконструкції та інтеграції України до європейської екологічної політики.

Висновки до розділу 4

Запропоновані інструменти формують модель, у якій екологічні технології перестають бути додатковими витратами і стають фінансовою перевагою. Міжнародний досвід підтверджує, що розвиток зеленого будівництва забезпечує поєднання нормативних стимулів та економічної доцільності. Тому першочерговим завданням державної політики є створення умов, за яких green-проекти в Україні стають конкурентоспроможними порівняно з традиційними.

Висновки

Розвиток «зеленого» будівництва є ключовим елементом економічного відновлення та довгострокової стратегії сталого розвитку України. На відміну від країн Європейського Союзу та провідних світових ринків, де сертифікаційні системи LEED, BREEAM та національні стандарти супроводжуються комплексними фінансовими та регуляторними стимулами, в Україні досі відсутній цілісний механізм державної підтримки. Це призводить до низької інвестиційної активності, подовженого строку окупності та слабкої конкурентоспроможності «зелених» проектів порівняно з традиційними, що прямо впливає на стан довкілля.

Досвід європейських міст доводить, що успішний розвиток сталого будівництва забезпечується поєднанням податкових пільг, знижених кредитних ставок, грантових програм, муніципальних стимулів та спрощених дозвільних процедур. Економічні моделі демонструють, що за наявності таких інструментів строк окупності green-проектів скорочується до 6–10 років, при цьому досягається суттєве зниження експлуатаційних витрат, викидів CO₂ та інших забрудників у навколишнє середовище.

В Україні основними бар'єрами розвитку є: відсутність фінансових стимулів та спеціальних податкових режимів; розрізненість нормативної бази; складність дозвільних процедур; обмежені можливості фінансування; недостатня поінформованість інвесторів щодо економічних переваг зелених технологій. Для їх подолання необхідне впровадження комплексної державної політики, що поєднує економічні, регуляторні та організаційні інструменти.

Запропонована дорожня карта імплементації передбачає поетапний перехід до системи стимулювання green-будівництва: підготовчий етап і пілотні проекти – законодавче закріплення – національне масштабування та моніторинг результатів. Реалізація такої моделі дасть змогу сформувати прогнозований інвестиційний клімат, збільшити частку сертифікованих проектів до 10–15% у найближчі п'ять років, скоротити енергоспоживання будівель та інтегрувати український сектор девелопменту в європейський простір сталого розвитку.

«Зелене» будівництво має розглядатися не як додаткові витрати, а як інвестиція у енергоефективність, економічну стійкість і безпечне міське середовище. Воно здатне стати рушієм модернізації та інструментом повоєнного відновлення країни. Україна має можливість використати унікальний шанс – відбудувувати міста за принципами сталості, інтегруючи найкращі міжнародні практики.

Час переходити від декларацій до дій. Інвестиції у «зелене» будівництво – це інвестиції в економічне та екологічне майбутнє України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Allen, J. (2023). *Green Building Economics and Policy*. MIT Press.
2. European Commission. (2023). *Energy performance of buildings directive (EPBD) framework*. <https://energy.ec.europa.eu>
3. U.S. Green Building Council. (2023). *LEED certification system overview*. <https://www.usgbc.org>
4. Building Research Establishment. (2023). *BREEAM technical standards*. <https://www.breeam.com>
5. World Green Building Council. (2022). *Global status report for buildings and construction*. <https://worldgbc.org>
6. International Energy Agency. (2023). *Energy efficiency indicators and building sector analysis*. <https://iea.org>
7. UNEP. (2023). *Buildings and Climate Global Report*. <https://unep.org>
8. KfW Bankengruppe. (2023). *Energy-efficient construction and refurbishment programme overview*. <https://www.kfw.de>
9. NFOŚiGW – National Fund for Environmental Protection and Water Management (Poland). (2023). *Grant programmes for sustainable construction*. <https://nfosigw.gov.pl>
10. Business Green. (2023). *UK green infrastructure investments and carbon offset schemes*. <https://www.businessgreen.com>
11. Copenhagen Municipality. (2022). *CPH2025 Climate Plan: Carbon neutrality strategy*. C40 Cities Climate Leadership Group. <https://c40.org>
12. en.fm.dk. (2023). *Danish national recovery plan and municipal green financing mechanisms*. Danish Ministry of Finance.
13. Dudkowiak & Putyra Law Firm. (2024). *Tax system in Poland: VAT and corporate taxation overview*. <https://dudkowiak.com>
14. Tax Foundation. (2023). *Corporate tax comparison across OECD*. <https://taxfoundation.org>
15. Government of the United Kingdom. (2023). *Corporation tax and commercial incentives guidance*. <https://www.gov.uk>
16. State Tax Service of Ukraine. (2024). *Tax legislation updates 2024–2025*. <https://tax.gov.ua> (in Ukrainian)
17. Accace Ukraine. (2025). *Overview of tax and financial regulatory changes for businesses*. <https://accace.com>
18. Bloomberg L.P. (2017). *Bloomberg European Headquarters – sustainability performance case study*. <https://www.bloomberg.com/company>
19. Artelia Group. (2019). *Amager Bakke / CopenHill: Project overview and performance indicators*. <https://www.arteliagroup.com>
20. EDGE Buildings. (2022). *Global certified green buildings database and case references*. <https://www.edgebuildings.com>
21. Baker McKenzie. (2023). *Ukraine: Legal framework for construction and real estate*. Baker McKenzie Resource Hub.
22. WiseEuropa & EU Funding Observatory. (2023). *EU investments in green construction and subsidy programmes*. <https://wise-europa.eu>
23. State of Green. (2024). *Green transition and sustainable construction policies in Denmark: Key policy tools and incentive models*. <https://stateofgreen.com>
24. Greater London Authority. (2021). *The London Plan 2021: Spatial development strategy for Greater London*[PDF]. <https://www.london.gov.uk>

Список скорочень

Скорочення Розшифровка / Значення

CAPEX	Capital Expenditures – капітальні витрати
OPEX	Operating Expenditures – експлуатаційні / оперативні витрати
NPV	Net Present Value – чиста приведена вартість
IRR	Internal Rate of Return – внутрішня норма прибутковості
WACC	Weighted Average Cost of Capital – середньозважена вартість капіталу
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design – міжнародна система сертифікації «зелених» будівель
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method – британська система сертифікації «зелених» будівель
ESG	Environmental, Social, Governance – критерії сталого та відповідального інвестування
PV	Photovoltaic – фотоелектрична / сонячна панель / система
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – німецька система сертифікації сталого будівництва
EU	European Union – Європейський Союз

Стаття надійшла до редакції 25.11.25, надійшла після рецензування 10.02.26, прийнята 02.03.26

The article was received 25.11.25, received after revision 10.02.26, accepted 02.03.26

Глущенко Роман Олександрович

доктор філософії, асистент, Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: Проспект Повітряних сил України, 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2863-1480> **e-mail:** gr2017inc@gmail.com

УДК 378.22.016:502](477+437.6)

Olena Mitryasova¹

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

Ruslan Mariychuk²

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8464-4142>; **e-mail:** ruslan.mariychuk@unipo.sk

Andrii Mats¹

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

¹Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

²University of Presov, Presov, Slovakia

MASTERS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE: EDUCATIONAL TRAINING IN UKRAINE AND SLOVAKIA

Abstract. *Purpose of the Study:* To conduct a comparative analysis of master-level environmental education training between Ukraine and Slovakia, with a specific focus on the curricula of Petro Mohyla Black Sea National University and the University of Prešov.

Design / Method / Approach: the study is based on a comparative analysis of the master's programs in ecology at both universities. It employs a method of juxtaposing key educational program parameters, such as study duration, credit system, number of disciplines, teaching methods, and approaches to final knowledge assessment, alongside a detailed review of course specifics. The analysis also includes a comparison of general trends in higher education in Ukraine and Slovakia, including demographic changes and the impact of external factors.

Research Results: both universities share a fundamental understanding of ecological principles and environmental science. However, significant differences were identified: the University of Prešov offers more specialized courses (e.g., limnecology, soil ecology, insect ecology, beekeeping) and emphasizes the acquisition of specific technical skills (GIS, analytical chemistry, statistics) and English language proficiency. Petro Mohyla Black Sea National University, conversely, focuses more on applied ecology and environmental management, policy, and modeling. Differences are also observed in study duration (1 year 4 months at PMBSNU versus 2 years at the University of Prešov) and the number of educational credits.

Theoretical Significance of the Study: This research deepens the understanding of diverse approaches to environmentalist training at the master's level within a European context. It provides valuable theoretical foundations for future comparative studies of educational systems, demonstrating how various national and institutional priorities shape specialized educational programs.

Practical Significance of the Study: the research findings can be utilized by Ukrainian and Slovak universities to harmonize and enhance their master's programs in ecology, adapting them to labor market demands and international standards. The information is also beneficial for students considering international studies, as well as for educational policy makers aiming to optimize national higher education systems.

Originality / Value / Scientific Novelty of the Study: the originality of this research lies in conducting a unique comparative analysis of master's programs in ecology between specific universities in Ukraine and Slovakia, a topic rarely explored in scientific literature. Its value stems from shedding light on specific curricula,

allowing for a detailed understanding of their strengths and potential gaps. The scientific novelty lies in presenting current data and conclusions regarding the adaptation of educational programs within the context of Ukraine's European integration and the impact of demographic changes.

Prospects for Further Research / Limitations of the Study: a limitation of this study is its focus on only two universities and a specific degree level (Master's), which prevents generalization of findings to all higher environmental education in Ukraine and Slovakia. Prospects for further research include expanding the analysis to a larger number of universities, other specializations, and comparing teaching quality and graduate employment rates. A more detailed examination of the impact of the current military situation on the educational process would also be pertinent.

Keywords: *Master's programmes; Environmental education; Higher education; Bologna Process; Curricula; Comparative analysis.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.95-109>

Introduction

Over two decades have passed since Ukraine embarked on its higher education reform, adopting a clear direction towards European integration. Recent years have seen specific, concerted efforts to align with the Bologna Process, aiming to establish a unified European educational space. A key contemporary feature in higher education development is the integration of national systems for training specialists across various fields. This is achieved by addressing common challenges and implementing a harmonized educational policy at both regional and international levels. Such integration processes introduce European educational norms and standards, while also fostering the exchange of scientific and cultural achievements. Ultimately, these steps are designed to bolster Ukraine's European identity.

The pursuit of European integration within Ukraine's higher education system is not merely a political declaration; it represents a fundamental shift in pedagogical paradigms, quality assurance mechanisms, and academic mobility. This strategic direction aims to ensure that Ukrainian degrees are recognized and valued across Europe, opening new opportunities for both students and faculty. Implementing the principles of the Bologna Process, such as the three-cycle degree system (Bachelor, Master, PhD), the European Credit Transfer and Accumulation System (ECTS), and quality assurance frameworks, has necessitated significant structural and content-related transformations within Ukrainian universities. These reforms are critical for enhancing the competitiveness of Ukrainian graduates in the global labor market and fostering an academic environment that encourages innovation and research excellence (Luhovyi, 2015; The Law of Ukraine "On Higher Education", 2014; Vyshnevskiy, 2016).

Furthermore, the integration process extends beyond formal structures, touching upon the very essence of academic culture. It involves promoting student-centered learning, encouraging critical thinking, and developing interdisciplinary approaches to education. Internationalization, a cornerstone of this integration, facilitates partnerships with European universities, joint research projects, and academic exchange programs. Such collaborations are vital for sharing best practices, enhancing curricula with global perspectives, and exposing students and faculty to diverse educational methodologies. The exchange of knowledge and experience with countries like Slovakia, which has a well-established European higher education

system, becomes particularly valuable. These interactions contribute to building a resilient and adaptable higher education sector in Ukraine, capable of responding to evolving societal needs and global challenges.

However, this ambitious integration path has not been without its challenges. The transformation requires substantial financial investment, a continuous update of legislative frameworks, and a cultural shift within academic communities. Overcoming resistance to change, ensuring adequate funding, and developing effective mechanisms for quality assurance remain ongoing tasks. Despite these hurdles, the commitment to European integration remains strong, driven by the understanding that a modern, high-quality higher education system is fundamental for Ukraine's democratic development and its future prosperity. The current geopolitical landscape, marked by the ongoing conflict, further underscores the urgency and importance of strengthening Ukraine's ties with the European educational space, providing both continuity and opportunities for academic growth amidst adversity. This context makes the comparative study of educational practices, particularly in specialized fields like environmental science, even more pertinent. The integration trends in Ukraine's higher education over recent years have been extensively analyzed in numerous scientific works (Dobko et al., 2014; Holovchuk et al., 2007; Rashkevych, 2014; Bulgakova and Rahmanov, 2011; Mitryasova, 2020, and etc.). Comparative analyses of environmentalist training in European universities are explored in publications by Bogolyubov (2014), Kofanova (2012), Mariychuk (2020), Ridej (2011), Rudyshyn (2008), Petruk (2015), Slivka et al. (2016), Sichkar (2013), and Zakon & Vasylyshyn (2018). The importance of environmental competence (Hrechanyk, 2018) and environmental culture (Ryzhkov, 2017) in this training is also widely discussed.

Slovakia, with a population of approximately 5.4 million, has around 20 universities, equating to roughly one university per 270,000 people (Slovak Accreditation Agency for Higher Education, n.d.). In contrast, Ukraine, with an initial population of about 41 million before the full-scale war, had approximately 200 universities, or one university per 205,000 people. This indicates that Ukraine, pre-war, had a slightly higher number of universities per capita than Slovakia.

As of January 2023, the Office of the United Nations High Commissioner for Refugees reported that about 8 million people had left Ukraine. It's crucial to acknowledge that this figure is dynamic and subject to constant change (REFUGEES FROM UKRAINE).

The demographic realities, particularly those exacerbated by geopolitical events, significantly impact the landscape of higher education in both countries, but most profoundly in Ukraine. Prior to the full-scale invasion, Ukraine maintained a robust network of higher education institutions, aiming for broad accessibility to university-level studies across its vast territory. The ratio of universities to population highlighted a commitment to providing widespread educational opportunities, reflecting a post-Soviet legacy of extensive higher education provision. While a higher number of institutions per capita might initially suggest greater access, it also raises questions about the concentration of resources, the quality of infrastructure, and the potential for fragmentation of expertise across a large number of universities. In peacetime, this expansive network supported regional development and catered to diverse student populations, including those in smaller towns and rural areas.

However, the ongoing conflict has drastically reshaped Ukraine's demographic profile, profoundly affecting its higher education system. The exodus of

approximately 8 million people – a significant portion of the total population – has led to an unprecedented decrease in the potential student pool, as well as a brain drain of academics and researchers. This mass displacement not only reduces the number of domestic students but also creates immense challenges for universities in maintaining their teaching staff, research capacities, and physical infrastructure, especially in regions directly affected by hostilities. Many institutions have been forced to relocate, adapt to online learning, or operate under constant threat. The dynamic nature of refugee figures underscores the fluidity of the situation and the continuous adaptation required from the Ukrainian educational sector.

In light of this outflow, Ukraine's current population is estimated at approximately 33 million. With around 200 universities, this translates to roughly one university per 165,000 people. In Slovakia, with a population of 5.4 million and 20 universities, the ratio is approximately one university per 270,000 people. This suggests that, even factoring in population displacement, Ukraine currently has fewer universities per capita than Slovakia. This shift highlights a critical turning point for Ukrainian higher education, as institutions face the dual challenge of adapting to a reduced domestic student body while simultaneously striving to retain quality and attract international students.

Furthermore, it is vital to remember that university count isn't the sole indicator of higher education quality. Factors such as teaching quality, scientific research, international collaborations, and graduate employment are equally significant. Slovakia, despite having fewer universities, benefits from its established integration within the European Higher Education Area, which often translates into more extensive international partnerships, access to European funding, and streamlined recognition of qualifications. Its smaller, more concentrated university system might allow for greater resource allocation per institution and a more focused approach to specialized fields.

The current situation has also prompted a significant number of Ukrainian students to seek education abroad, with Slovakia becoming an increasingly attractive destination due to its geographical proximity, cultural similarities, and the availability of accessible educational programs. This influx of Ukrainian students into Slovak universities further underscores the interconnectedness of the two countries' educational landscapes and highlights the role of international student mobility in mitigating the impact of conflict on educational continuity. Understanding these complex demographic and systemic interactions is crucial for a comprehensive comparative analysis of environmental education training, as it shapes the context in which future specialists are prepared to address pressing global and regional challenges. Considering the outflow of about 8 million Ukrainians due to the Russian-Ukrainian war, Ukraine's current population is estimated at approximately 33 million. With around 200 universities, this translates to roughly one university per 165,000 people. In Slovakia, with a population of 5.4 million and 20 universities, the ratio is approximately one university per 270,000 people. This suggests that, even factoring in population displacement, Ukraine currently has fewer universities per capita than Slovakia. However, it's vital to remember that university count isn't the sole indicator of higher education quality. Factors such as teaching quality, scientific research, international collaborations, and graduate employment are equally significant. Furthermore, a substantial number of Ukrainian students are now pursuing studies in Slovakia.

Leading universities in Ukraine include Taras Shevchenko National University of Kyiv, V. N. Karazin Kharkiv National University, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv Polytechnic Institute), and Ivan Franko National University of Lviv. These institutions represent the pinnacle of academic excellence in Ukraine, encompassing a wide spectrum of disciplines from fundamental sciences and humanities to cutting-edge engineering and technological fields. Taras Shevchenko National University of Kyiv, often considered the flagship university, boasts a rich history dating back to 1834 and is renowned for its comprehensive educational offerings and strong research output across numerous faculties. It plays a pivotal role in shaping Ukraine's intellectual and scientific landscape, contributing significantly to both national and international discourse. V. N. Karazin Kharkiv National University, established in 1804, is one of the oldest and largest universities in Eastern Europe. Despite facing immense challenges due to the ongoing conflict, it remains a vital scientific and educational hub, particularly strong in natural sciences, physics, and mathematics. Kyiv Polytechnic Institute, a leading technical university, is instrumental in preparing highly skilled engineers and IT specialists, driving innovation in crucial sectors of the economy. Its focus on applied sciences and robust industry partnerships makes it a key player in Ukraine's technological advancement. Ivan Franko National University of Lviv, with its deep historical roots dating back to the 17th century, is a prominent center for humanities, social sciences, and natural sciences in Western Ukraine, contributing significantly to the region's cultural and academic life. The resilience of these universities, particularly those in frontline regions, in continuing their educational and research missions amidst adversity, underscores the profound commitment to higher education within Ukraine. They are not merely educational establishments but strategic national assets, crucial for the country's recovery and future development.

In Slovakia, prominent institutions include Comenius University in Bratislava, Slovak Technical University in Bratislava, Pavol Josef Šafárik University in Košice, Technical University in Košice, and the University of Žilina. Comenius University, founded in 1919, stands as Slovakia's oldest and largest university, offering a broad range of academic programs and excelling in various scientific disciplines, including medicine, law, natural sciences, and humanities. It is a cornerstone of Slovak academic life, widely recognized for its research capabilities and contribution to national development. The Slovak Technical University in Bratislava is the country's largest and most important university of technology, specializing in engineering, architecture, and computer science. It plays a crucial role in providing highly qualified technical professionals and fostering innovation, particularly in collaboration with industry. Moving eastward, Pavol Josef Šafárik University in Košice is a comprehensive institution with strong faculties in medicine, natural sciences, law, and arts, serving as a vital academic center for eastern Slovakia. The Technical University in Košice complements this by focusing on engineering and technology, contributing significantly to the industrial and technological landscape of the region. Finally, the University of Žilina, situated in northern Slovakia, is renowned for its specialization in transport, communications, and management, reflecting the strategic importance of logistics and infrastructure development in the country. These Slovak universities, through their diverse specializations and established integration within the European Higher Education Area, consistently contribute to the nation's human capital and innovation capacity, serving as key

drivers of societal and economic progress. Their stability and high quality make them attractive partners for international collaboration, including with Ukrainian institutions, particularly in times of heightened cross-border mobility. Key differences in higher education between Ukraine and Slovakia encompass several aspects. For instance, funding is predominantly public in Ukraine, whereas Slovakia employs a mix of public and private sources. In terms of structure, Ukraine's system is more centralized, contrasting with Slovakia's more decentralized approach. International cooperation is generally more extensive in Slovakia. The language of instruction is Ukrainian in Ukraine and Slovak in Slovakia, though both countries offer English-language programs. Both nations are active participants in the Bologna Process. Finally, accessibility to education also varies: Slovakia provides free education at public universities if studies are conducted in Slovak, while Ukraine has both state-funded ("budget") and contract-based places (QS World University Rankings 2025: Top global universities). Before the full-scale war, approximately 1.5 million students were enrolled in Ukraine, a number that has significantly decreased due to the conflict. Slovakia hosts around 130,000–150,000 students and is increasingly favored by Ukrainian students seeking a safe and affordable study destination. This has narrowed the student number gap between the two countries, though these figures are approximate and subject to change.

In Ukraine, environmentalists are trained at numerous universities, as environmental majors are quite common. These programs are notably offered at Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ivan Franko National University of Lviv, V. N. Karazin Kharkiv National University, and other large universities nationwide. Slovakia also trains environmentalists at several institutions, including Comenius University in Bratislava and Pavol Josef Šafárik University in Košice. However, overall, Ukraine boasts a greater number of universities offering environmental majors than Slovakia, reflecting its larger size and higher number of higher education institutions.

Purpose of the study: to conduct a comparative analysis of master-level environmental education training between Ukraine and Slovakia, with a specific focus on Petro Mohyla Black Sea National University and the University of Prešov.

Object of the study: the educational training for master's-level environmentalists in Ukraine and Slovakia.

Subject of the study: the concepts and characteristics of the educational programs in ecology offered by Petro Mohyla Black Sea National University and the University of Prešov.

Petro Mohyla Black Sea National University (PMBSNU) in Mykolaiv, Ukraine, and the University of Prešov, Slovakia, serve as compelling examples for this comparative study of master's-level environmental education. Both are multidisciplinary higher education institutions, yet they present notable differences in their institutional structure, student populations, and core educational philosophies. These distinctions are not accidental; they are deeply rooted in their unique historical trajectories and their evolving priorities within their respective national contexts.

PMBSNU, a relatively young institution, was established in 1996 in Mykolaiv, a vital port city. Its creation reflected Ukraine's post-independence push to broaden access to higher education and cultivate intellectual growth in key regional hubs. From its inception, PMBSNU has been recognized for its robust focus on humanities and social sciences, quickly becoming a prominent academic center in Southern Ukraine. Currently, it enrolls approximately 4,000 students. This size often allows for a more

personalized learning environment compared to the larger, more established universities. A defining characteristic of PMBSNU's approach is its strong emphasis on interdisciplinarity. This means fostering connections across various fields of study, encouraging students to develop a comprehensive understanding of complex issues, and preparing them for careers that increasingly demand diverse skill sets. This philosophy is particularly pertinent in areas like environmental science, where effective solutions often require insights from biology, economics, sociology, and policy. The university's more recent founding has also afforded it the agility to integrate modern educational methodologies and adapt quickly to contemporary challenges, including navigating the complexities of online learning and supporting displaced students and faculty amidst ongoing conflict. Despite immense pressures, PMBSNU remains steadfast in its crucial mission, demonstrating remarkable resilience and an unwavering commitment to academic continuity.

In significant contrast, the University of Prešov boasts a much more venerable history, tracing its origins back to 1665. This long and rich heritage provides the university with deep-seated academic traditions and a well-established institutional framework. As a comprehensive university, it offers an exceptionally broad spectrum of programs, ranging from theology and humanities to natural sciences and medical sciences. This extensive academic portfolio caters to a wide array of student interests and societal demands, reflecting centuries of intellectual evolution. With approximately 8,000 students, the University of Prešov is larger than PMBSNU, yet it maintains a strong regional presence and focus. A key priority for the University of Prešov is regional development, underscoring its profound commitment to serving the social, economic, and cultural needs of its immediate geographical area. This often translates into research initiatives and academic programs specifically tailored to local industries, environmental concerns, and community requirements. Furthermore, the university places a significant emphasis on international cooperation. This commitment is a testament to Slovakia's long-standing integration into broader European academic networks, facilitating student and faculty exchanges, joint research projects, and alignment with continent-wide educational standards. This robust international engagement equips students with global perspectives and opportunities, enhancing their professional readiness in an increasingly interconnected world.

Theoretical part, materials and methods

To effectively compare the master's-level environmental education programs in Ukraine and Slovakia, a rigorous theoretical framework and clear methodological approach are essential. This section delves into the conceptual underpinnings of environmental education and outlines the methods employed for the comparative analysis. Understanding the nuances of each programme requires a systematic examination of their curriculum structures, learning outcomes, and overall educational philosophies. By comparing specific elements, we aim to highlight both shared principles and distinct characteristics that shape the training of future environmental specialists in these two countries. This detailed comparison forms the basis for our subsequent findings and discussion (Mitryasova and Mariychuk, 2025).

Comparative analysis of the concepts of educational programmes in ecology (Master level) at the Petro Mohyla Black Sea National University and the University of Prešov is in a Table 1.

Table 1. Comparative analysis of educational programme concepts (Standard of Master; MAIS)

Common information	Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine	University of Prešov, Slovakia
App name, short description	The standard load for a student is 90 credits. The Ecology and Environmental Protection program offers a comprehensive study of ecological principles and their application to environmental issues. It covers theoretical foundations, research methodologies, and practical aspects of conservation, management, and assessment, preparing graduates for diverse roles in the environmental field.	The standard load for a student is 120 credits. The graduate is an expert in ecology, ecosystems, biodiversity protection, nature, landscape, and the care of protected areas. He is proficient in scientific research methods (both basic and applied). He can creatively apply scientific knowledge, solve human-nature conflict situations, and verify various ecological hypotheses. He has practical experience gained through internships and student work experience in state institutions, the private sector, and non-governmental organizations. The graduate is able to work and manage working groups (field and laboratory), can appropriately identify and take samples, store them, process the obtained data, and evaluate and interpret them correctly. The graduate is employed in management functions of nature and landscape protection, in scientific research institutions, in international cooperation of protected areas, and at universities.

According to the data in Table 2, the educational programmes in ecology at the Petro Mohyla Black Sea National University and the University of Prešov have both similar and different characteristics; both programs offer a master's degree, but the duration of study at PMBSNU is shorter than at the University of Prešov, which may indicate a different approach to the organization of the educational process or a different number of ECTS credits required to obtain a degree.

Table 2. Comparative analysis of educational ecology programmes.

Parameter	Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine	University of Prešov, Slovakia
Name of the educational program	E2 Ecology, "Ecology and Environmental Protection"	Ecological and Environmental Sciences (1610T00)
Term of study	1 year 4 months	2 years
Total number of disciplines, including practices	11 (90 credits)	24 (120 credits)
Number of disciplines per semester	6–8	5–6
Teaching methods	Combined	Combined
Final control of knowledge	Master thesis defense (12)	Diploma thesis defense (15) State exam (5)

Both programmes share a fundamental commitment to core ecological principles. Courses like "Forest Ecology," "Landscape Ecology," "Soil Ecology," and "Biodiversity" in the University of Prešov curriculum align with courses such as "Ecology" and topics found within "System analysis of environmental quality" in the PMBSNU programme. This indicates a shared emphasis on the foundational knowledge of ecological systems and processes.

Both curricula integrate environmental science concepts. The University of Prešov includes "Introduction to Environmental Science," "Chemistry of the Environment," and "Global Problems of the Environment", while PMBSNU offers courses like "Environmental Management and Audit" and "Technologies of Environmental Protection." This demonstrates that both programs recognize the importance of applying ecological knowledge to address environmental challenges.

Both programmes emphasize research skills and thesis preparation. The University of Prešov has "Diploma Thesis Seminar 1" and "Diploma Thesis Seminar 2", and PMBSNU includes "Methodology and organization of scientific research in ecology" and "Pre-diploma practice," culminating in "Diploma thesis defense" in Prešov. This highlights the importance of developing students' research capabilities for their master's theses.

Both programmes incorporate practical training, though the format varies. The University of Prešov has "Large ecological practicum" and "Professional practice 2", while PMBSNU includes "Assistant practice" and "Pre-diploma practice." This reflects the need for hands-on experience in ecological and environmental studies.

Both programmes include courses that address current environmental concerns. The University of Prešov offers "Global Environmental Issues" and "Environmental Crisis - Reality vs. Media", and PMBSNU includes "Global Environmental Change and Environmental Management in the EU" and "Strategies of Sustainable Development." This indicates a focus on preparing students to tackle contemporary environmental problems.

Results and Discussion

The comparative analysis of master's-level environmental education programmes at the University of Prešov in Slovakia and Petro Mohyla Black Sea National University (PMBSNU) in Ukraine reveals both shared foundational principles and distinct pedagogical approaches. While both institutions are committed to equipping future ecologists with essential knowledge and skills, their curricula diverge in specific areas, reflecting differing priorities, historical contexts, and perhaps responses to national and international demands.

Our detailed comparison highlights several pivotal distinctions in the professional training of ecologists at the two universities. The curriculum at the University of Prešov notably offers a higher degree of specialized courses within particular ecological domains. This is evident in dedicated modules such as "Limnecology," "Soil Ecology," "Lichen Ecology," "Ecology and Biodiversity of Insects," "Ecophysiology and Stress Physiology of Plants," "Ecology and Biodiversity of Parasites," and "Ecology and Biodiversity of Soil Animals." This deep dive into specific ecological niches suggests a pedagogical philosophy aimed at producing highly specialized researchers or field experts who possess in-depth knowledge of particular ecosystems or organism groups. Such a granular approach allows students to develop profound expertise, which can be invaluable for advanced scientific

research, conservation biology, or specialized environmental consulting roles. While PMBSNU certainly covers a broad spectrum of environmental topics, its curriculum, based on the provided data, does not appear to offer the same level of dedicated, niche-specific courses. This may indicate a broader, more interdisciplinary approach to ecological studies, aiming for a versatile generalist rather than a deep specialist. This difference could be attributed to varying academic traditions or distinct national requirements for environmental professionals. For instance, in a smaller country like Slovakia, specialized expertise might be highly valued for specific research institutions or targeted environmental projects, whereas a larger nation like Ukraine might prioritize a broader understanding to address diverse environmental challenges across its vast territory.

Another significant distinction lies in the explicit inclusion of courses focused on specific technical and analytical skills within the University of Prešov's curriculum. Courses like "Geographical Information System (GIS)," "Analytical Chemistry," and "Statistic 2" are prime examples. These modules are crucial for equipping students with practical, hands-on competencies that are indispensable for modern ecological research, data analysis, and effective environmental management. GIS, for instance, is fundamental for spatial analysis of environmental data, mapping ecosystems, and monitoring environmental changes. Analytical chemistry provides the necessary background for understanding pollutants and environmental processes, while robust statistical skills are paramount for designing experiments, interpreting research findings, and drawing valid conclusions. While PMBSNU does include "Geoinformation Systems in Ecology," the level of explicit specialization in analytical chemistry and advanced statistics, as standalone, dedicated courses, is less apparent from the provided curriculum data. This could imply that such skills are integrated into broader courses, or that the emphasis might be placed more on theoretical understanding than on practical application of these specific tools. The clear emphasis at the University of Prešov suggests a deliberate effort to prepare graduates for research-intensive roles or positions requiring strong quantitative and data-handling abilities.

In contrast, the PMBSNU curriculum appears to place a stronger emphasis on applied ecology and environmental management. This is evident through courses such as "Ecological Management and Audit," "Technologies of Environmental Protection," and a broader focus on environmental policy and modeling. This orientation suggests that PMBSNU aims to produce graduates who are not only knowledgeable about ecological principles but also adept at implementing practical solutions, managing environmental projects, and contributing to policy development. Graduates from such a program would be well-suited for roles in environmental consulting, governmental environmental agencies, industrial environmental departments, or non-governmental organizations focused on practical conservation and pollution control. While the University of Prešov's curriculum undoubtedly includes elements relevant to applied ecology, its overall specialization seems to lean more towards fundamental and specific ecological areas rather than comprehensive management frameworks. This difference reflects varying educational goals: PMBSNU seems to prioritize the professional who can directly apply ecological knowledge to solve real-world environmental problems, while the University of Prešov may be geared more towards academic research or highly specialized scientific roles.

A noteworthy element in the University of Prešov curriculum is the explicit inclusion of "English Language 3." This dedicated language course underscores the institution's recognition of the increasing importance of English proficiency in the global scientific and environmental community. English is the lingua franca of international research, conferences, and publications, and strong English skills are crucial for accessing cutting-edge scientific literature, collaborating with international partners, and contributing to global environmental discourse. While language skills are undoubtedly valuable and expected in any higher education program, their explicit listing as a separate, required course in the University of Prešov curriculum suggests a deliberate pedagogical choice to ensure graduates are well-equipped for an international career path. The absence of an explicitly listed separate language course in the PMBSNU curriculum does not necessarily imply a lack of emphasis on English, but it might mean that language development is integrated into other courses or is considered a prerequisite rather than a core component of the master's program itself.

A particularly unique inclusion in the University of Prešov curriculum is the presence of "Beekeeping 1" and "Beekeeping 2." While the broader topic of biodiversity is covered in both programs, this specific focus on apiculture is distinctive to the University of Prešov. This unique offering could reflect regional interests, specific research strengths within the faculty, or a response to particular environmental or agricultural needs within Slovakia. Beekeeping is intrinsically linked to ecosystem health, pollination services, and biodiversity conservation, making it a relevant, albeit specialized, area within environmental studies. Its inclusion highlights how universities can tailor their curricula to leverage unique local expertise or address specific regional challenges and opportunities. This contrasts with PMBSNU's more generalized approach to biodiversity, which does not delve into such specific practical applications.

In conclusion, both the University of Prešov and PMBSNU curricula share a common foundation in ecological principles and environmental science, essential for any master's program in this field. However, they also exhibit notable differences that shape the profile of their graduates. These disparities are evident in course specificity, the explicit inclusion of specialized skills, the balance between theoretical and applied ecology, and the level of detail provided about individual courses. The University of Prešov appears to cultivate highly specialized environmental researchers with strong analytical and language skills, potentially catering to specific scientific and academic roles. PMBSNU, on the other hand, seems to emphasize a broader, more applied approach to environmental management, preparing graduates for diverse roles in practical environmental protection and policy implementation. These differences are not indicative of one program being inherently "better" than the other, but rather reflect distinct educational philosophies and responses to different academic and societal contexts. Understanding these variations is crucial for prospective students, academic institutions, and policymakers seeking to align educational outcomes with evolving environmental challenges and professional demands in both Ukraine and Slovakia.

Conclusions

This study offers a comparative analysis of master's-level environmental education between Ukraine and Slovakia, specifically examining programs at Petro Mohyla Black Sea National University (PMBSNU) and the University of Prešov.

Our findings underscore that both institutions share a foundational commitment to ecological principles and environmental science, aligning with the broader European trend of integrating national higher education systems. Ukraine's two-decade journey towards European integration, including its participation in the Bologna Process, has significantly shaped its educational landscape, as evidenced by the curriculum at PMBSNU. Similarly, Slovakia's well-established higher education system, despite a smaller population, demonstrates robust engagement in environmental training.

The comparative analysis revealed several key distinctions in curriculum design and focus. The University of Prešov's program stands out for its emphasis on highly specialized ecological domains, offering dedicated courses in areas like limnecology, soil ecology, and insect ecology. It also integrates essential technical skills such as GIS, analytical chemistry, and statistics, along with mandatory English language training. This approach suggests a focus on developing highly specialized environmental scientists equipped with diverse methodological tools. Conversely, PMBSNU's curriculum appears to place a stronger emphasis on applied ecology and environmental management, including coursework in environmental policy and modeling. This reflects a practical orientation aimed at addressing real-world environmental challenges, possibly driven by Ukraine's ongoing reforms and the need for professionals capable of implementing environmental policies. The differences in study duration (1 year 4 months at PMBSNU versus 2 years at the University of Prešov) and the associated credit requirements further highlight distinct pedagogical approaches to master's-level education.

Despite these differences, both universities demonstrate a shared commitment to developing research skills, with both programs culminating in a master's thesis defense and incorporating practical training components. This commonality underscores the universal recognition of the importance of hands-on experience and independent research in environmental studies.

The socio-demographic context, particularly the impact of the Russian-Ukrainian war on Ukraine's population and student numbers, adds another layer of complexity to this comparison. While pre-war Ukraine had a slightly higher number of universities per capita than Slovakia, the significant outflow of population has altered this ratio. This demographic shift has also made Slovakia an increasingly attractive destination for Ukrainian students, influencing student mobility and potentially highlighting areas where educational systems can adapt to external pressures.

In conclusion, while both Ukraine and Slovakia are committed to fostering environmental expertise through master's programs, their approaches differ in specialization and pedagogical structure. These findings provide valuable insights for continuous curriculum development, fostering international academic collaboration, and ensuring that future environmental professionals are well-prepared to address complex global challenges. Further research could expand this analysis to a broader range of universities and explore the long-term career outcomes of graduates from these differing educational models.

Acknowledgements

We gratefully acknowledge the invaluable support provided for this research. This study was funded under the National Scholarship Programme of the Slovak Republic, SAIA. We extend our sincere thanks for enabling this comparative analysis of environmental education.

REFERENCES

1. Bogolyubov, V. M. (2014). *Theoretical and methodological foundations of forming professional competence of future ecologists in the conditions of transition to sustainable development of society* (Doctoral dissertation abstract in pedagogical sciences, specialty 13.00.02 – Theory and methods of teaching agricultural disciplines). Kyiv. [in Ukrainian]
2. Bulgakova, N. B., & Rakhmanov, V. O. (2011). *Methods of teaching in higher education*. National Aviation University "NAU-Druk". [in Ukrainian]
3. Dobko, T., Holoviano, M., Kaikova, O., Terzian, V., & Tikhonen, T. (Eds.). (2014). *The imperative of quality: Learning to appreciate and evaluate higher education*. Manuscript Company Publishing. [in Ukrainian]
4. Holovchuk, A. F., Ishchenko, T. D., Akimov, O. O., Marenichenko, V. V., & Khomenko, M. P. (2007). *University education in Ukraine and the Bologna Process: Textbook and terminological dictionary*. Agrarian Education. [in Ukrainian]
5. Hrechanyk, V. (2018). Environmental competence as a component of professional training of future ecologists. *Scientific Journal of National Pedagogical Dragomanov University. Series 5. Pedagogical sciences: realities and prospects*, (65), 58–62. [in Ukrainian]
6. Kofanova, E. V. (2012). *Chemical preparation of future environmental engineers: Theory and practice*. NTU "KPI". [in Ukrainian]
7. Luhovyi, V. I. (2015). Bologna Process and higher education in Ukraine. *Higher Education of Ukraine*, (3), 5–12. [in Ukrainian]
8. MAIS. (n.d.). Retrieved from <https://student.unipo.sk/maisportal/studijneProgramy.mais>
9. Mariychuk, R. (2020). Implementation of the principles of "green chemistry" in the training of specialists in chemical and environmental specialties. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Education and Science: Remembering the Past, Creating the Future"*. Drahomanov National Pedagogical University.
10. Mitryasova, O. (2020). An integrated approach to education content. *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*, 7(1), 30–38.
11. Mitryasova, O., Mariychuk, R. (2025). Education Innovations in Training Students-Ecologists as a Response to Modern Challenges: Green and Digitalization Paradigms: Monograph. Mykolaiv: PMBSNU–Presov: University of Presov. <https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/2854>
12. National Framework of Qualifications of Ukraine. (2011). *Law of Ukraine № 2628-VI*. [in Ukrainian]
13. Petruk, V. (2015, February 11). Scientific and methodological approaches to form a list of specialties ecological profile. Vinnytsia National Technical University. <http://ineek.vntu.edu.ua/index.php/2010-04-14-11-40-08/293-2015-02-11-14-44-26> [in Ukrainian]
14. QS World University Rankings 2025: Top global universities. (n.d.). Retrieved from <https://www.topuniversities.com/world-university-rankings?countries=ua>
15. Refugees from Ukraine: who are they, how many are there, and how to return them? (n.d.). Retrieved from <https://ces.org.ua/wp-content/uploads/2023/09/refugees.pdf>
16. Ridei, N. M. (2011). *Stepwise training of future ecologists: Theory and practice* (2nd ed.). Odli-Plus Publishing. [in Ukrainian]
17. Rudyshyn, S. D. (2008). The state of environmental education in the practice of higher education institutions in foreign countries. *Bulletin of Zhytomyr State University named after Ivan Franko. Pedagogical Sciences*, (40), 81–85. [in Ukrainian]
18. Ryzhkov, L. V. (2017). Formation of environmental culture of students in the conditions of sustainable development. *Scientific Bulletin of Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytsky. Series: Pedagogical Sciences*, (1), 114–119. [in Ukrainian]
19. Shved, O. V. (2019). European vector of higher education development in Ukraine: Challenges and prospects. *Actual Problems of Economics*, (6), 118–127. [in Ukrainian]

20. Sichkar, N. Y. (2013). Development of environmental education in Ukraine: Historical aspect and current state. *Problems of Education*, (75), 183–187. [in Ukrainian]
21. Slivka, M., Sukharev, S., Shkumbatiuk, R., Mariychuk, R., & Lendel, V. (2016). Environmental education monitoring of teaching chemistry for students environmental specialties. In *Proceedings of 7th International Conference of ICEEE*, Budapest, Hungary.
22. Slovak Accreditation Agency for Higher Education (SAAVŠ). (n.d.). Retrieved from Insert relevant URL, e.g., <https://www.saaavs.sk/en/>
23. Verkhovna Rada of Ukraine. (2014). *Law of Ukraine "On Higher Education"*. [in Ukrainian]
24. Vyshnevskiy, O. V. (2016). Modernization of higher education in Ukraine in the context of European integration. *Scientific Journal of National Pedagogical Dragomanov University. Series 5. Pedagogical sciences: realities and prospects*, (54), 16–21. [in Ukrainian]
25. Zakon, R., & Vasylyshyn, R. (2018). Comparative analysis of environmental education systems in Ukraine and EU countries. *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series: Pedagogics, Social Work*, 1(42), 110–113. [in Ukrainian]

The article was received 04.11.25, received after revision 09.01.26, accepted 24.02.26

О. Мітрясова, Р. Марійчук, А. Мац

МАГІСТРИ ЕКОЛОГІЇ: ОСВІТНЯ ПІДГОТОВКА В УКРАЇНІ ТА СЛОВАЧЧИНІ

Анотація. Мета дослідження: здійснити порівняльний аналіз освітньої підготовки магістрів-екологів в Україні та Словаччині, зосереджуючись на навчальних програмах Чорноморського національного університету імені Петра Могили та Пряшівського університету.

Дослідження ґрунтується на порівняльному аналізі навчальних планів магістерських програм з екології обох університетів. Використано метод зіставлення ключових параметрів освітніх програм, таких як тривалість навчання, кредитна система, кількість дисциплін, методи викладання та підходи до фінального контролю знань, а також детальний огляд специфіки курсів. Аналіз також включає порівняння загальних тенденцій у вищій освіті України та Словаччини, включаючи демографічні зміни та вплив зовнішніх факторів.

Виявлено, що обидва університети мають спільне базове розуміння екологічних принципів та природоохоронної науки. Однак існують значні відмінності: Пряшівський університет пропонує більш спеціалізовані курси (наприклад, лімнологія, екологія ґрунту, екологія комах, бджільництво), а також акцентує на набутті специфічних технічних навичок (ГС, аналітична хімія, статистика) та володінні англійською мовою. Чорноморський національний університет імені Петра Могили, натомість, більше зосереджений на прикладній екології та екологічному менеджменті, політиці та моделюванні. Різниця також спостерігається у тривалості навчання (1 рік 4 місяці в ЧНУ проти 2 років у Пряшівському університеті) та кількості навчальних кредитів.

Дослідження поглиблює розуміння різноманітності підходів до підготовки екологів на магістерському рівні в європейському контексті. Воно надає цінні теоретичні основи для подальших компаративних досліджень освітніх систем, демонструючи, як різні національні та інституційні пріоритети формують спеціалізовані освітні програми.

Результати дослідження можуть бути використані українськими та словацькими університетами для гармонізації та вдосконалення своїх магістерських програм з екології, адаптації до вимог ринку праці та міжнародних стандартів. Інформація корисна для студентів, які розглядають навчання за кордоном, а також для розробників освітньої політики з метою оптимізації національних систем вищої освіти.

Оригінальність дослідження полягає у проведенні порівняльного аналізу магістерських програм з екології між конкретними університетами України та Словаччини, що рідко зустрічається в науковій літературі. Цінність полягає у висвітленні специфіки навчальних планів, що дозволяє детально зрозуміти їхні сильні потенційні сторони та прогалини. Наукова новизна полягає у представленні актуальних даних та висновків щодо адаптації освітніх програм у контексті європейської інтеграції України та впливу демографічних змін.

Обмеження дослідження полягає у фокусі на лише двох університетах та конкретному рівні (магістр), що не дозволяє узагальнювати висновки на всю вищу екологічну освіту України та Словаччини. Перспективи подальших досліджень включають розширення аналізу на більшу кількість університетів, інших спеціальностей, а також порівняння якості викладання та працевлаштування випускників. Доцільним буде також вивчення впливу поточної військової ситуації на освітній процес більш детально.

Ключові слова: магістерські програми; екологічна освіта; вища освіта; Болонський процес; навчальні плани; порівняльний аналіз.

Стаття надійшла до редакції 04.11.25, надійшла після рецензування 09.01.26, прийнята 24.02.26

Олена Мітрясова

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Адреса робоча: Десантників, 10, Миколаїв, Україна, 54003

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

Руслан Марійчук

Пряшівський університет, Пряшів, Словаччина

Адреса робоча: вул. 17 Листопада, 15, Пряшів, Словаччина, 08001

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8464-4142> **e-mail:** ruslan.mariychuk@unipo.sk

Андрій Мац

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Адреса робоча: Десантників, 10, Миколаїв, Україна, 54003

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

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

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

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

Oksana Ilchuk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6352-5320> **e-mail:** oksana_i@i.ua

Olena Zemlyanska, Senior lecturer of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

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

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE WELDING PROCESS ON AEROSOL RELEASE

***Abstract.** The purpose of this article is to assess the influence of the parameters of the manual and mechanized arc welding process on their hygienic characteristics and to identify the main factors that affect the release of welding aerosols. It is shown that during manual welding with covered electrodes, the level of aerosol release depends on the welding modes: welding current, polarity and arc voltage. Regardless of the type of electrodes used, an increase in the welding current leads to an increase in the level of harmful emissions. In contrast to welding with covered electrodes, the dependence of the level of aerosol release indicators formed during mechanized welding in protective gases with a consumable electrode on the welding mode is more complex – first, the intensity of aerosol formation increases to a maximum, then decreases to a minimum and increases again. It is shown that the process of aerosol formation consists of two stages: evaporation of metal in the arc zone and removal of part of the vapor beyond the arc, where they condense into solid aerosol particles. The removal of vapor from the arc zone is prevented by the immersion of the arc into the weld pool. Increasing the arc power first contributes to increased evaporation, and then to deeper penetration of the base metal, which minimizes aerosol release. Based on studies of weld pool macrosections, it was*

found that the shape of the weld pool also influences the complex nature of such dependencies. For each diameter of the welding wire, there are certain values of the welding current at which the maximum amount of harmful substances is released, and a range of current values that ensures the minimum intensity of their release. When welding at optimal modes, the level of aerosol release decreases when using wires of smaller diameter. The obtained research results show how the correct choice of welding materials, shielding gas and welding modes makes it possible to reduce the levels of harmful substance release.

Keywords: *electric arc welding, manual, mechanized, hygienic characteristics, aerosol, emission intensity, specific emission, recommendations.*

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

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

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ВИДІЛЕННЯ АЕРОЗОЛЮ

Анотація. *Мета даної статті – оцінити вплив параметрів процесу ручного та механізованого дугового зварювання на їх гігієнічні характеристики і виявити основні чинники, які впливають на виділення зварювальних аерозолів. Показано, що під час ручного зварювання покритими електродами рівень виділень аерозолу залежить від режимів зварювання: зварювального струму, полярності та напруги дуги. Незалежно від типу застосовуваних електродів збільшення зварювального струму призводить до зростання рівня шкідливих виділень. На відміну від зварювання покритими електродами, залежності показників рівня виділень аерозолів, що утворюються під час механізованого зварювання в захисних газах плавким електродом, від режиму зварювання мають складніший характер – спочатку інтенсивність утворення аерозолу підвищується до максимуму, потім знижується до мінімуму і знову підвищується. Показано, що процес утворення аерозолів складається з двох етапів: випаровування металу в зоні дуги та винесення частини пари за межі дуги, де вони конденсуються у тверді частинки аерозолів. Виносу пари із зони дуги перешкоджає занурення дуги у зварювальну ванну. Підвищення потужності дуги спочатку сприяє збільшенню випаровування, а потім поглибленню проплавлення основного металу, що знижує до мінімуму виділення аерозолу. На основі досліджень макрошліфів зварювальної ванни було встановлено, що на складний характер таких залежностей здійснює свій вплив і форма зварювальної ванни. Для кожного діаметра зварювального дроту існують певні значення зварювального струму, за яких виділяється максимальна кількість шкідливих речовин, і ділянка значень сили струму, що забезпечує мінімальну інтенсивність їх виділення. При зварюванні на оптимальних режимах рівень виділення аерозолів зменшується під час використання дротів меншого діаметра. Отримані результати досліджень показують, як правильний вибір зварювальних матеріалів, захисного газу та режимів зварювання дає можливість знижувати рівні виділень шкідливих речовин.*

Ключові слова: *електродугове зварювання, ручне, механізоване, гігієнічні характеристики, аерозоль, інтенсивність виділення, питома виділення, рекомендації.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.110-123>

Вступ

Для розроблення гігієнічних рекомендацій щодо зниження рівнів виділення шкідливих речовин зварювальних аерозолів (ЗА) у повітря робочої зони шляхом вибору оптимальних параметрів процесу зварювання необхідні дані про залежності рівнів їх виділень і хімічного складу від способу і режимів зварювання. Як відомо [1, 2], хімічний склад та рівень виділень ЗА визначається не лише складом (маркою) зварювального матеріалу та захисного газу, а й режимом зварювання (видом, полярністю і величиною зварювального струму, напругою електричної дуги). Для встановлення відповідних залежностей необхідно виконати спеціальні дослідження з метою пошуків нових технологічних способів поліпшення гігієнічних характеристик зварювальних матеріалів (покритих електродів і зварювальних дротів).

Постановка завдання

Серед усіх відомих шкідливих і небезпечних факторів зварювального процесу найбільшу загрозу для здоров'я зварників становить зварювальний аерозоль, від якого й досі зварник захищений недостатньо. Про це свідчать результати медичних обстежень, які доводять, що серед професійних захворювань зварників України та інших держав приблизно 80 % становлять бронхолегеневі, спричинені впливом ЗА. Це – пневмоконіоз, що виявився у зварників, які пропрацювали у зварювальних цехах понад 15 років, та хронічний бронхіт, що виникає вже через 5 років праці в професії зварника. Під час виконання зварювальних робіт у недоступних для вентиляції закритих просторах період розвитку пневмоконіозу скорочується до 5 років. Крім того, вплив ЗА на органи дихання може підвищувати ризик розвитку онкологічних захворювань. Отже, традиційні способи зварювання часто не відповідають сучасним вимогам безпеки, що зумовлює підвищений ризик професійних захворювань серед зварників [2-5].

Головними завданнями даного дослідження є:

- встановлення залежностей показників рівнів виділень ЗА від режиму зварювання;
- аналіз залежностей рівнів виділень ЗА під час ручного дугового зварювання покритими електродами та механізованого в захисних газах;
- рекомендації до вибору оптимальних режимів зварювання.

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.

Результати дослідження

Ручне дугове зварювання покритими електродами

Випаровування електродного та основного матеріалів під час зварювання, у результаті чого утворюється ЗА, значною мірою залежить від температурних умов у зоні дугового розряду. Останні залежать від режимів зварювання: зварювального струму, полярності та напруги дуги [2]. Вітчизняними та

зарубіжними дослідниками однозначно встановлено, що незалежно від типу електродів, що застосовуються, збільшення зварювального струму призводить до зростання рівня виділень ЗА. Це зумовлено підвищенням температури крапель металу на торці електрода, що призводить до інтенсифікації випаровування. На рис. 1 наведено типову залежність показників рівня виділень ЗА (інтенсивності V_a та питомого виділення G_a) від величини зварювального струму для електродів діаметром 3,2–8 мм із покриттям ільменітового виду.

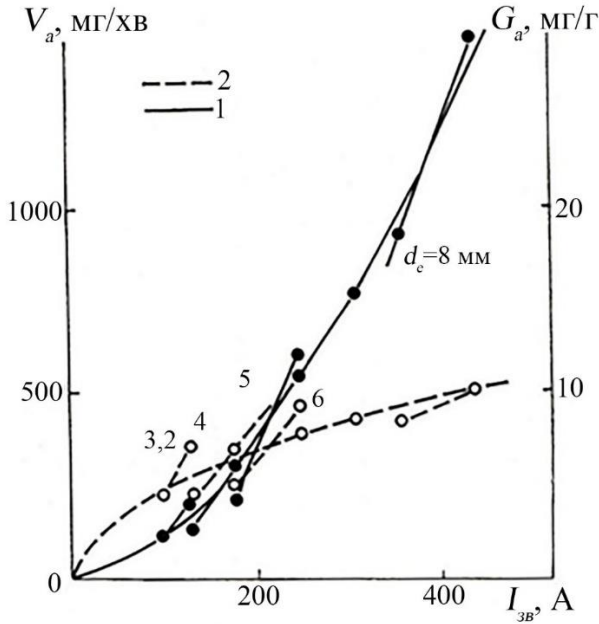


Рис. 1. Залежність показників рівня виділень ЗА: інтенсивності виділення V_a (суцільні криві 1) та питомого виділення G_a (штрихові криві 2) від величини зварювального струму для електродів з ільменітовим покриттям діаметром 3,2–8 мм

Залежність інтенсивності виділення ЗА від сили зварювального струму має параболічний характер і описується рівнянням [6]

$$V_a = A I_{зв}^n,$$

де V_a – інтенсивність виділення ЗА, мг/хв; A і n – емпіричні постійні, величина яких залежить від виду покриття: $A = 0,0361$ для електродів з ільменітовим покриттям, $0,4519$ – для електродів з рутиловим покриттям, $0,0697$ – для електродів з основним покриттям; показник n відповідно дорівнює 1,73; 1,17 та 1,65; $I_{зв}$ – зварювальний струм.

Характерно, що електрод меншого діаметра виділяє більше ЗА, ніж електрод більшого діаметра, якщо зварювання виконується на струмі однакової величини. Очевидно, це зумовлено тим, що за однакового зварювального струму щільність його у електрода меншого діаметра вища, ніж в електроді більшого діаметра. Відповідно й температура нагрівання крапель на торці електрода меншого діаметра вища.

Залежність питомого виділення ЗА від зварювального струму має більш пологий характер у порівнянні із залежністю інтенсивності виділення ЗА. Це пояснюється одночасним збільшенням швидкості плавлення електродів зі зростанням зварювального струму. Тому темп зростання показника виділення ЗА в розрахунку на одиницю маси спаленого електрода менший, ніж показник інтенсивності виділення ЗА.

Збільшення зварювального струму зазвичай супроводжується зростанням номінальної напруги на дузі, тобто потужність зварювальної дуги зростає як через зростання струму, так і в результаті збільшення напруги дуги. Спостерігається пропорційна залежність інтенсивності виділення ЗА від потужності дуги.

Встановлено, що великий вплив на кількість виділень ЗА виявляє напруга дуги [6–8]. Її збільшення внаслідок подовження дуги спричиняє суттєве збільшення інтенсивності утворення ЗА. Це зумовлено, по-перше, погіршенням умов захисту розплавленого металу на торці електрода від кисню навколишнього повітря, тобто збільшенням окисного потенціалу атмосфери дуги, що, як показано вище, інтенсифікує виділення ЗА. По-друге, приріст потужності дуги, викликаний зростанням напруги через її подовження, марно витрачається на випромінювання в навколишній простір, практично не збільшуючи швидкість плавлення електрода. У результаті обидва показники, що характеризують рівень виділення ЗА – інтенсивність та питоме виділення ЗА, – зростають зі збільшенням довжини дуги.

Якщо збільшення напруги дуги обумовлено її стисненням, воно також викликає зростання рівня виділень ЗА, але меншою мірою, ніж подовження дуги, оскільки при стисненні дуги умови захисту зони плавлення електрода від навколишнього повітря не погіршуються.

Відомості про вплив роду струму та полярності на рівень виділення ЗА суперечливі. У більшості робіт зазначається, що за інших рівних умов найбільша інтенсивність виділення ЗА спостерігається при зварюванні постійним струмом зворотної полярності [7, 9]. Цей факт добре узгоджується з експериментальними даними про більш високу температуру крапель на торці електрода у разі зварювання на зворотній полярності. Проте при зварюванні високопродуктивними електродами з рутиловим та кислим покриттями найбільша інтенсивність виділення ЗА має місце при зварюванні на прямій полярності [7]. При зварюванні змінним струмом інтенсивність виділення ЗА, зазвичай, нижча, ніж при зварюванні постійним струмом. Таку залежність можна пояснити періодичним зниженням зварювального струму до нульового значення (на відміну від постійного струму), що тягне за собою відповідні температурні зміни нагріву металу на торці електрода і інтенсивності випаровування електродного матеріалу, що плавиться [10].

З показників, що характеризують режим зварювання, лише швидкість зварювання не створює помітного впливу на рівень виділення ЗА.

Відхилення положення електрода від вертикалі призводить до невеликого збільшення інтенсивності виділення ЗА [6]. Очевидно, зростання виділення ЗА у цьому випадку обумовлено деяким погіршенням захисту зони плавлення електрода від кисню навколишнього повітря.

Механізоване зварювання в захисних газах

На відміну від зварювання покритими електродами, залежності показників рівня виділень ЗА, що утворюються під час механізованого зварювання в захисних газах плавким електродом, від режиму зварювання мають складніший характер [2, 11]. Для встановлення останнього виконано такі дослідження.

Відбирання проб ЗА здійснювали у відповідності з методикою [12] в процесі наплавлення валиків дротом Св-08Г2С діаметром 2 мм на пластини зі сталі ВСтЗсп. Режими наплавлення: $I_{зв}$ – 180...520 А (струм постійний, полярність зворотна), U_d – 21,5...36,5 В, швидкість зварювання – 16 м/год; виліт електрода – 25 мм, витрата газу – 20 л/хв. Використовували такі захисні гази: CO₂, суміші 75 % Ar + 25 % CO₂ та 70 % Ar + 25 % CO₂ + 5 % O₂.

Із результатів досліджень (рис. 2) видно, що залежність інтенсивності виділень ЗА від величини зварювального струму має складний характер. Вона досягає максимальних значень при використанні CO₂, мінімальних – суміші Ar + CO₂.

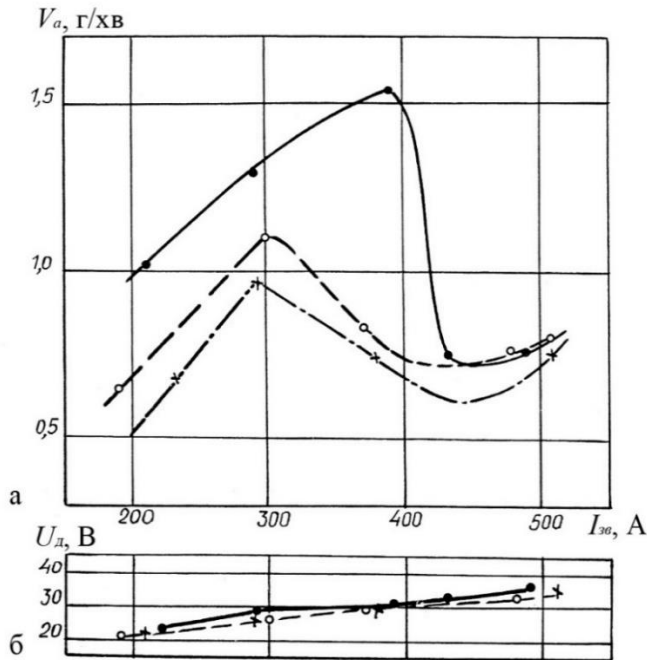


Рис. 2. Залежність інтенсивності утворення ЗА V_a від сили зварювального струму (а) і вольт-амперні характеристики дуги (б): ● – зварювання в CO₂; ○ – Ar+O₂+CO₂; x – Ar+CO₂ (дріт Св-08Г2С)

На першій ділянці кривої (рис. 2) підвищення інтенсивності утворення ЗА зі збільшенням зварювального струму, звісно, пояснюється зростанням потужності дуги. Як показано в роботі [11], інтенсивність утворення ЗА залежить від характеру перенесення електродного металу. Її підвищення пояснюється збільшенням енергії дуги та посиленням розбризкування електродного металу. Бризки металу, що потрапляють у повітря, інтенсивно окислюються, що сприяє утворенню великої кількості ЗА.

Висока інтенсивність утворення ЗА при зварюванні в CO_2 пояснюється підвищеним розбризкуванням і окисленням електродного металу в порівнянні зі зварюванням в сумішах на основі аргону. При зварюванні в суміші $\text{Ar}+\text{O}_2+\text{CO}_2$ наявність кисню збільшує окисний потенціал газового середовища, тому інтенсивність виділень ЗА вища, ніж при зварюванні в суміші $\text{Ar}+\text{CO}_2$ [2].

На другій ділянці кривої (рис. 2) зниження інтенсивності виділення ЗА обумовлено зміною характеру перенесення електродного металу. При зварюванні в сумішах на основі аргону перенесення металу стає дрібнокрапельним (струменевим), а при зварюванні у вуглекислому газі – великокрапельним (без коротких замикань, з поступовим зануренням дуги у зварювальну ванну). Очевидно, зменшення розбризкування металу і занурення дуги у зварювальну ванну сприяє зменшенню викиду кількості парів металу за межі дуги. У разі застосування сумішей, що містять аргон, зниження інтенсивності виділення ЗА спостерігається за умови меншого зварювального струму порівняно зі зварюванням в CO_2 . Якщо зварювальний струм перевищує 420 А, інтенсивність виділення ЗА знову зростає (рис. 2). Це пов'язано зі збільшенням довжини дуги, площі поверхні зварювальної ванни та зменшенням глибини занурення дуги у ванну, що призводить до підвищення інтенсивності утворення парів та їх видалення із зони дуги.

Мінімальне виділення ЗА забезпечується за зварювального струму близько 420 А і напруги дуги 32...34 В. Застосування зварювання на цьому режимі доцільно і з технологічної точки зору. Для всіх досліджених захисних газів інтенсивність виділення ЗА в процесі зварювання на такому режимі приблизно однакові. Отже, у разі занурення дуги у зварювальну ванну склад захисного газу не має помітного впливу на утворення аерозолі.

Таким чином, можна стверджувати, що процес утворення ЗА складається з двох етапів:

1 – випаровування металу в зоні дуги;

2 – винесення частини пари за межі дуги, де вона конденсується у тверді частинки ЗА.

Виносу пари із зони дуги сприяє розбризкування металу, а перешкоджає занурення дуги у зварювальну ванну.

Підвищення потужності дуги спочатку сприяє збільшенню випаровування, а потім поглибленню проплавлення основного металу, що знижує до мінімуму виділення ЗА. Тому зварювання зануреною дугою є найбільш прийнятним у гігієнічному відношенні.

Визначення питомих виділень ЗА (рис. 3) дозволило оцінити втрати металу на випаровування. Максимальні втрати металу при зварюванні в CO_2 , $\text{Ar}+\text{CO}_2$, $\text{Ar}+\text{O}_2+\text{CO}_2$ становлять близько 2, 1,3 і 1,5 % відповідно. Зі збільшенням зварювального струму (для сумішей на основі аргону – починаючи з 300 А) ці втрати зменшуються, що покращує як гігієнічні, так і економічні характеристики процесу зварювання.

Зварювання в CO_2 характеризується тим, що питоме виділення ЗА на відміну від його інтенсивності утворення завжди знижується (рис. 3). Це пояснюється випереджаючим темпом розплавлення електродного дроту зі збільшенням зварювального струму порівняно з темпом зростання інтенсивності утворення ЗА (див. рис. 2).

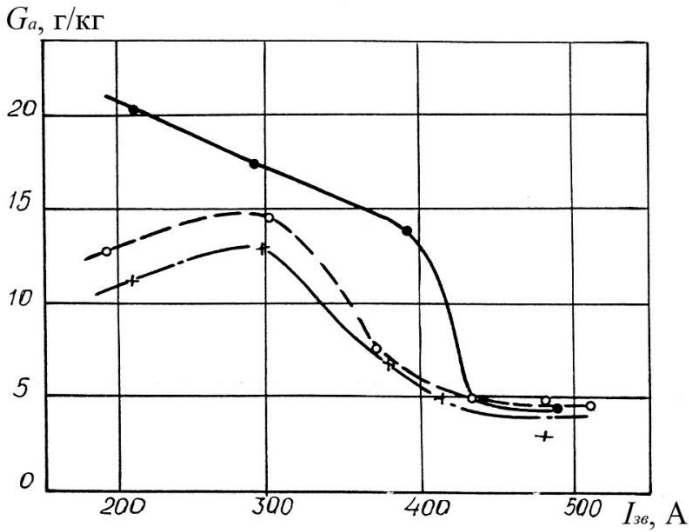


Рис. 3. Залежність питомих виділень ЗА G_a від сили зварювального струму: ● ○ x – див. рис. 2

Отже, для кожного діаметра зварювального дроту існують певні значення зварювального струму, за яких виділяється максимальна кількість ЗА, і ділянка значень сили струму, що забезпечує мінімальну інтенсивність виділення (рис. 4). Проте питомі виділення ЗА у разі зварювання в CO_2 завжди знижуються (рис. 5) з характерними перегинами кривих, що відповідають графікам (рис. 4).

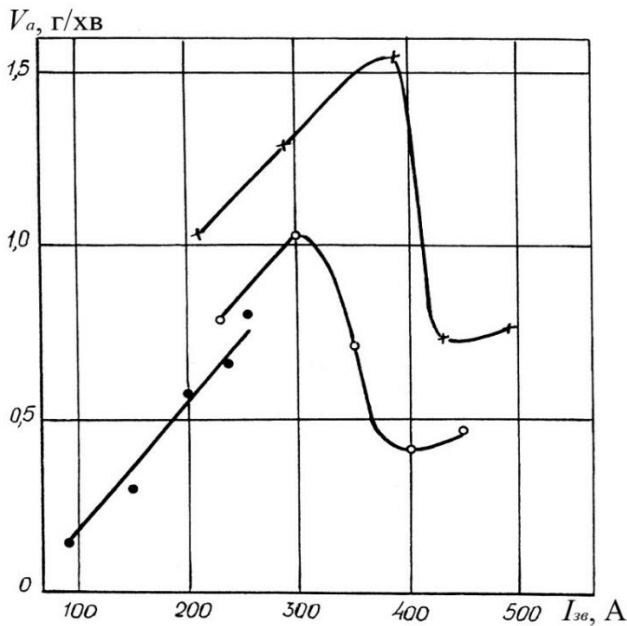


Рис. 4. Залежність інтенсивності утворення ЗА при зварюванні в CO_2 від сили струму: ● – зварювання дротом Св-08Г2С діаметром 1,2 мм; ○ - 1,6 мм; x – 2,0 мм

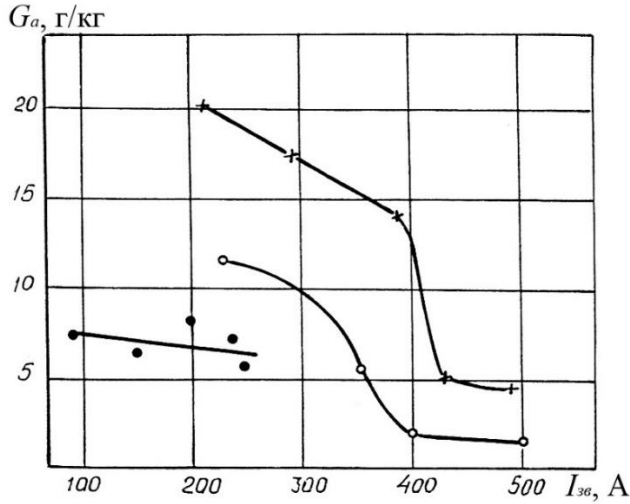


Рис. 5. Залежність питомих виділень ЗА від сили зварювального струму: ● ○ x – див. рис. 3

Складні екстремальні залежності інтенсивності виділення ЗА від режиму зварювання, що мають максимум і мінімум виділень, пояснюються не тільки потужністю зварювальної дуги, а й видом перенесення електродного металу. Разом з тим було встановлено, що на складний характер таких залежностей впливає і форма зварювальної ванни [2]. Для цього досліджували вплив режиму зварювання (сили зварювального струму та напруги дуги) на основні характеристики зварювальної ванни: ширину i і глибину h проплавлення, висоту опуклості c шва, а також їх зв'язок з показниками рівня виділень ЗА. Ці характеристики швів визначали на зразках металу, наплавленого у вуглекислому газі дротом марки Св-08Г2С діаметром 2,0 мм на пластину сталі ВСт3сп товщиною 12 мм. Наплавлення робили в тих же умовах, що і при дослідженні залежностей рівнів виділень ЗА від режиму зварювання. Режими наплавлення: зварювальний струм (постійний зворотної полярності) змінювався в межах від 200 до 500 А, напруга на дузі U_d відповідно – від 23 до 36 В, швидкість процесу наплавлення дорівнювала 16 м/год, виліт електрода становив 25 мм, витрата вуглекислого газу – 20 л/хв. Графіки будували по середніх значеннях із 6 вимірювань на макрошліфах зразків зварного шва, отриманих на кожному режимі.

Вивчення макрошліфів показало, що на всіх зразках (зокрема і наплавлених на режимі, що забезпечує мінімальне виділення ЗА) мають місце сприятливі геометричні параметри шва (таблиця). Це дозволяє шляхом підбору параметрів режиму зварювання забезпечити прийнятне поєднання необхідних геометричних параметрів шва та мінімальне виділення аерозолію.

З підвищенням зварювального струму та напруги на дузі глибина h та ширина проплавлення b , а також опуклість c шва збільшуються. Оскільки глибина проплавлення переважно визначається значенням зварювального струму, а ширина – напругою на дузі, розглянемо відповідні залежності.

Із рис. 6 видно, що залежність інтенсивності утворення ЗА від ширини проплавлення має складний вигляд з максимумом та мінімумом виділень.

Таблиця. Геометричні характеристики зварювальної ванни

№ шва	$I_{зв}, A$	$U_{д}, B$	$e, мм$	$h, мм$	$c, мм$
1	210	23,5	12,9	2,8	2,5
2	290	28,5	16,8	3,9	2,7
3	390	31,5	18,4	6,3	3,6
4	440	33,5	21,5	10,0	4,1
5	500	36,5	23,9	10,7	4,2

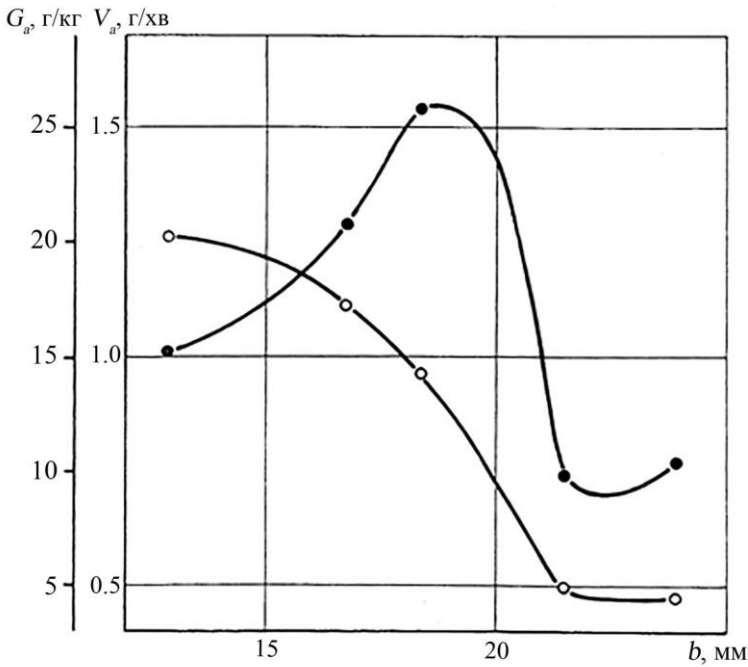


Рис. 6. Залежність інтенсивності V_a і питомого виділення G_a ЗА від ширини шва b при зварюванні в CO_2 дротом Св-08Г2С діаметром 2,0 мм

Залежність інтенсивності виділення ЗА від глибини проплавлення має схожий вигляд (рис. 7), що пояснюється впливом зварювального струму на глибину проплавлення.

Зіставлення залежностей інтенсивності утворення ЗА та глибини проплавлення від зварювального струму (рис. 8) показує, що різке зниження інтенсивності виділення ЗА при підвищенні струму від 400 до 440 відповідає різкому збільшенню глибини проплавлення металу. Це свідчить про те, що зниження інтенсивності утворення ЗА обумовлено зануренням дуги у зварювальну ванну внаслідок проплавлення основного металу.

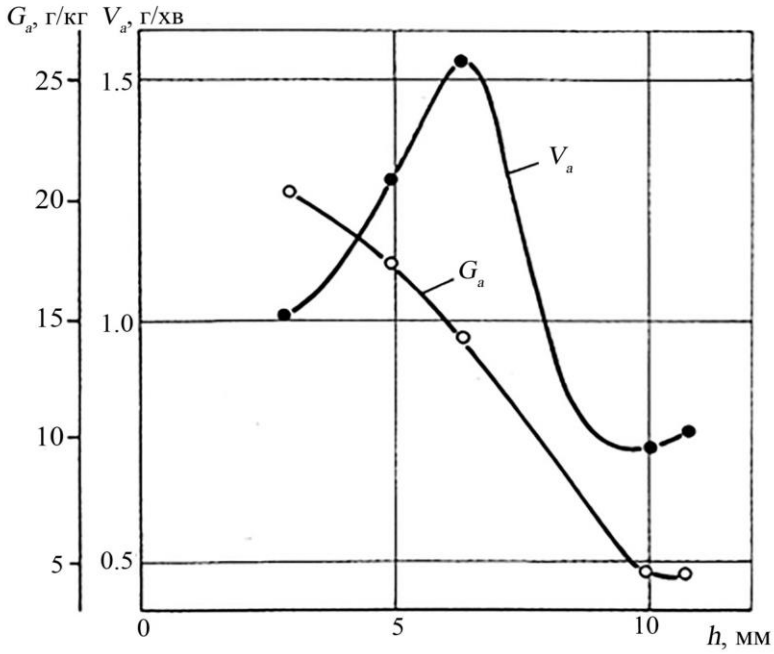


Рис. 7. Залежність інтенсивності V_a і питомого виділення G_a ЗА від глибини проплавлення h при зварюванні в CO_2 (Св-08Г2С, 2,0 мм)

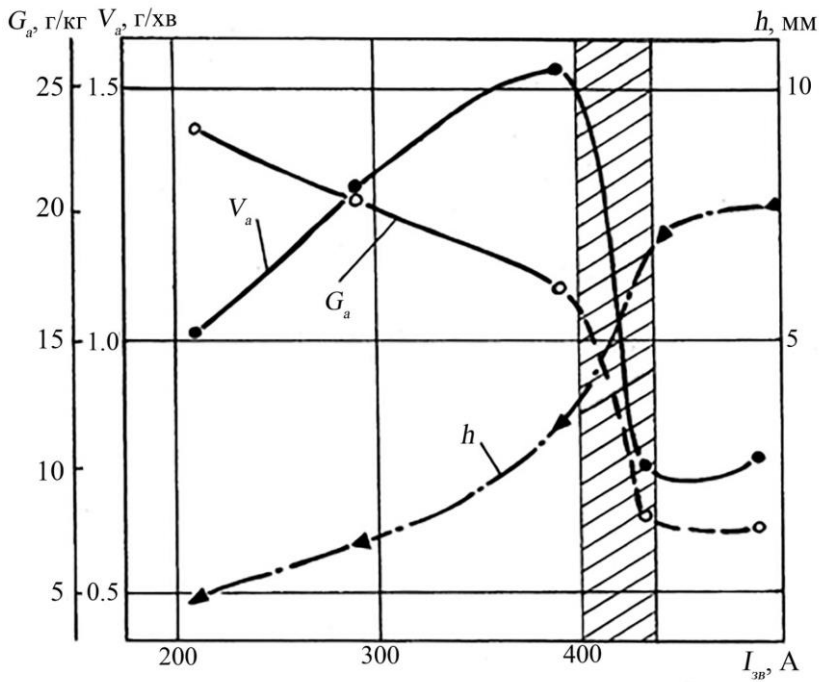


Рис. 8. Зіставлення інтенсивності V_a та питомого виділення G_a ЗА з глибиною проплавлення h залежно від зварювального струму при зварюванні в CO_2 (Св-08Г2С, 2,0 мм)

Отже, незважаючи на те, що рівень випаровування металу залежить і від площі поверхні зварювальної ванни, кількість викидів пари металу за межі дуги, головним чином, визначається глибиною її занурення у зварювальну ванну, яка залежить від глибини проплавлення основного металу. Глибина проплавлення, своєю чергою, залежить від тиску на поверхню зварювальної ванни плазмових потоків і потоку пари металу, які витісняють рідкий метал з-під основи стовпа дуги. Зі зростанням зварювального струму підвищується тиск дуги та збільшується глибина проплавлення. При цьому зварювальна дуга заглиблюється у ванну; пари металу переносяться з електрода на основний метал через дуговий проміжок, заповнений парами металу, і переважно конденсуються на основному металі. Незначна частина пари виноситься з ванни через проміжок між електродом і ванною в навколишню атмосферу [2].

Встановлено, що інтенсивне проплавлення основного металу починається за потужності дуги приблизно 12,3 кВт і закінчується при 14,4 кВт. Подальше підвищення потужності зануреної дуги сприяє вже збільшенню обсягу проплавлення внаслідок гарного контакту дуги з основним металом і високої тепловіддачі цьому металу, а отже, – і виходу пари із об'єму плавильного простору, що збільшується, за його межі (у повітря). При цьому інтенсивність утворення ЗА знову починає дещо збільшуватися (див. рис. 2, 8). Для дротів діаметром 1,6...2,0 мм мінімальні виділення відзначаються за потужності дуги 14,0...16,0 кВт.

Вивчення залежностей питомого виділення ЗА від режиму зварювання (див. рис. 3, 8) свідчить про те, що цей гігієнічний показник, жорстко пов'язаний з інтенсивністю утворення ЗА, – знижується при підвищенні зварювального струму, збільшенні ширини шва і глибини проплавлення. Причому максимальний темп зменшення питомого виділення ЗА відповідає ділянці різкого збільшення глибини проплавлення основного металу у разі підвищення зварювального струму (див. рис. 7, 8).

Таким чином, істотний вплив на інтенсивність утворення ЗА має форма зварювальної ванни (глибина проплавлення основного металу), що визначає рівень випаровування металу. Це необхідно враховувати для оптимізації технологічних параметрів режиму зварювання з метою зниження рівня виділень ЗА.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Інтенсивність утворення ЗА під час зварювання в захисних газах плавким електродом залежить від потужності зварювальної дуги, характеру перенесення електродного металу, ступеня його розбризкування і глибини занурення дуги в метал, що зварюється. Збільшення інтенсивності утворення ЗА з підвищенням зварювального струму та напруги дуги спостерігається у разі перенесення металу з короткими замиканнями. З переходом до краплинного перенесення без замикань дугового проміжку інтенсивність утворення ЗА починає знижуватися і досягає мінімуму при зануренні дуги у зварювальну ванну. Для кожного діаметра зварювальних дротів існують певні значення зварювальних струмів, за яких виділяється максимальна кількість ЗА, та діапазон струмів, що забезпечує мінімальну інтенсивність утворення ЗА. При зварюванні на оптимальних режимах рівень виділення ЗА зменшується під час використання дротів меншого діаметра.

Отримані результати досліджень показують, як правильний вибір зварювальних матеріалів, захисного газу та параметрів режиму зварювання дає можливість знижувати рівні виділень шкідливих речовин. Ці результати сприятимуть подальшому вдосконаленню технологій зварювання та модернізації зварювальних технологій, що дозволить поліпшити умови праці у зварювальному виробництві та знизити професійну захворюваність зварників.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Senthil Murugan, S. & Sathiya, P. (2024). Analysis of welding hazards from an occupational safety perspective. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, 66(3), 63-74. <https://doi.org/10.31276/VJSTE.2023.0007>
2. Левченко, О. Г. (2025). Зварювальні аерозолі і газу: процеси утворення, методи нейтралізації та засоби захисту. 2-ге вид., доповн. *Видавництво «Каравела»*, 226.
3. Fumees de soudage: valeurs limites, evaluation des risques, mesures de prevention. Etudes et recherche. Hygiene et securite. (2006). *Soudage et techniques connexes*, 7/8, 31-33.
4. Tanneberger, J. F.W.G. (2009). Schweißrauch am Arbeitsplatz – Gefahr für die Gesundheit. *Der Praktiker*, 9, 328.
5. Berlinger, B., Benker, N., Weinbruch, S. et al. (2010). Physicochemical characterization of different welding aerosols. *Anal Bioanal Chemistry*, 10, 1773–1789.
6. Kobayashi, M., Maki, S. & Ohe, I. (1976). Factors affecting the amount of fumes generated by manual metal arc welding. *IIW Doc. II E-211–76*, 22.
7. Eichorn, F., Trosken, F. & Oldenburg, T. (1980). Untersuchung der Entstehung gesundheitsgefahrender Schweißrauche beim Lichtbogen-handschweißen und Schutzgasschweißen: Forschungs-berichte. *Humanisierung des Arbeitslebens der Schweisser*, B2, 84.
8. Kimura, Y., Lchihara, I. & Kobayashi, M. (1974). Some quantitative evaluation of fumes generated from coated arc electrodes. *IIW Doc. II-701–74*, 17.
9. Jenkins, N., Met, A., Moreton, J. et al. (1981). *Welding Fume*, vol. 2. Published by the Welding Inst., Abington Hall Abington. *Cambridge CB16AL*, 211-506.
10. Kobayashi, M., Maki, S., Hashimoto, Y. & Suga, T. (1978). Some considerations about the formation mechanisms of welding fume. *Welding World*, 11-12, 238-245.
11. Levchenko, O. G. (1992). Effect of CO₂ welding conditions of structural steels on fume formation. *The Paton Welding Journal*, 4 (9-10), 525-527.
12. ДСТУ EN ISO 15011-1:2021. (2021). Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання проб аерозолів і газів, утворюваних під час дугового зварювання. Частина 1. Визначення швидкості виділення та відбирання проб для аналізування мікрочастинок аерозолів. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 8.

Стаття надійшла до редакції 25.11.25, надійшла після рецензування 20.01.26, прийнята 26.02.26

REFERENCES

1. Senthil Murugan, S. & Sathiya, P. (2024). Analysis of welding hazards from an occupational safety perspective. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*, 66(3), 63-74. <https://doi.org/10.31276/VJSTE.2023.0007>
2. Levchenko, O. G. (2025). *Welding aerosols and gases: Formation processes, neutralization methods, and protection means*. (2nd ed). Kyiv: *Caravela* [in Ukrainian].
3. Fumees de soudage: valeurs limites, evaluation des risques, mesures de prevention. Etudes et recherche. Hygiene et securite. (2006). *Soudage et techniques connexes*, 7/8, 31-33.

4. Tanneberger, J. F.W.G. (2009). Schweißrauch am Arbeitsplatz – Gefahr für die Gesundheit. *Der Praktiker*, 9, 328.
5. Berlinger, B., Benker, N., Weinbruch, S. et al. (2010). Physicochemical characterization of different welding aerosols. *Anal Bioanal Chemistry*, 10, 1773–1789.
6. Kobayashi, M., Maki, S. & Ohe, I. (1976). Factors affecting the amount of fumes generated by manual metal arc welding. *IIW Doc. II E-211–76*, 22.
7. Eichorn, F., Trosken, F. & Oldenburg, T. (1980). Untersuchung der Entstehung gesundheitsgefährdender Schweißrauche beim Lichtbogenhandschweißen und Schutzgasschweißen: Forschungsberichte. *Humanisierung des Arbeitslebens der Schweisser*, B2, 84.
8. Kimura, Y., Lchihara, I. & Kobayashi, M. (1974). Some quantitative evaluation of fumes generated from coated arc electrodes. *IIW Doc. II-701–74*, 17.
9. Jenkins, N., Met, A., Moreton, J. et al. (1981). *Welding Fume*, vol. 2. Published by the Welding Inst., Abington Hall Abington. *Cambridge CB16AL*, 211-506.
10. Kobayashi, M., Maki, S., Hashimoto, Y. & Suga, T. (1978). Some considerations about the formation mechanisms of welding fume. *Welding World*, 11-12, 238-245.
11. Levchenko, O. G. (1992). Effect of CO₂ welding conditions of structural steels on fume formation. *The Paton Welding Journal*, 4 (9-10), 525-527.
12. ДСТУ EN ISO 15011-1:2021. (2021). Health and safety in welding and allied processes. Laboratory method for sampling aerosols and gases generated during arc welding [Part 1]. Determination of release rate and sampling for analysis of aerosol microparticles. Kyiv: DP "UkrNDNTS", 8 [in Ukrainian].

The article was received 25.11.25, received after revision 20.01.26, accepted 26.02.26

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

Гльчук Оксана Степанівна

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/0000-0001-6352-5320> **e-mail:** oksana_i@i.ua

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

UDC 628.5

Yevhenii Lashko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9691-4648> **e-mail:** evgeny.lashko.lj@gmail.com

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

THE CONCEPT OF ENVIRONMENTAL-INDUSTRIAL SAFETY: FORMING A UNIFIED APPROACH

Abstract. *The article provides a comprehensive study of the concept and structure of the environmental-industrial safety system as an integrated model for managing the impacts of industrial activities on the environment, workers' health, and public well-being. It analyses the evolution of scientific approaches to understanding environmental-industrial safety, the connection of this concept with sustainable development, integrated environmental permits (IEP), and international HES (Health, Environment, Safety) systems. The necessity of a unified interdisciplinary approach to managing environmental and industrial risks is substantiated. Particular attention is paid to risk assessment methods within the HES framework, mathematical modeling and computer simulation of hazardous processes, and the development of a national risk management model that combines legal, technical, organizational, and digital mechanisms. Conceptual foundations for building Ukraine's environmental-industrial safety system in the context of harmonization with European directives and ESG requirements are proposed.*

Key words: *environmental-industrial safety, integrated environmental permit, HES system, risk management, ecological simulation, sustainable development, industrial ecology, safety digitalization.*

Є.Є. Лашко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна

ПОНЯТТЯ СИСТЕМИ ЕКОЛОГО-ВИРОБНИЧОЇ БЕЗПЕКИ: ФОРМУВАННЯ ЄДИНОГО ПІДХОДУ

Анотація. *У статті здійснено комплексне дослідження поняття та структури системи еколого-виробничої безпеки як інтегрованої моделі управління впливами промислового виробництва на довкілля, здоров'я працівників і населення. Проаналізовано розвиток наукових підходів до розуміння сутності еколого-виробничої безпеки, розкрито зв'язок цієї категорії з концепціями сталого розвитку, інтегрованого довкіллевого дозволу (ІДД) та міжнародних систем HES (Health, Environment, Safety). Обґрунтовано необхідність переходу до єдиного інтердисциплінарного підходу у формуванні системи управління екологічними та виробничими ризиками. Особливу увагу приділено методам оцінки ризиків у рамках системи HES, математичному та комп'ютерному моделюванню небезпечних процесів і формуванню національної моделі управління ризиками, яка поєднує правові, технічні, організаційні та цифрові механізми. Запропоновано концептуальні засади побудови системи еколого-виробничої безпеки України у контексті гармонізації з європейськими директивами та сучасними вимогами ESG-стратегій.*

Ключові слова: *еколого-виробнича безпека, інтегрований довкіллевий дозвіл, HES-система, управління ризиками, екологічне моделювання, сталий розвиток, промислова екологія, цифровізація безпеки.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.124-132>

Вступ

Сучасний етап розвитку промислового виробництва в Україні та світі характеризується переходом від ресурсно-виснажливих моделей економіки до парадигми сталого розвитку, де пріоритетом стає не тільки економічна ефективність, а й екологічна збалансованість і безпека працівників. В умовах глибокої трансформації промислового комплексу України, відновлення після воєнних руйнувань і модернізації інфраструктури особливого значення набуває формування ефективної системи еколого-виробничої безпеки (СЕВБ) – як інтегрованої системи управління екологічними, технологічними, виробничими та соціальними ризиками.

У міжнародній практиці подібні системи відомі як HES (Health, Environment, Safety) або HSE (Health, Safety, Environment) [1]. Вони об'єднують принципи охорони праці, техногенної безпеки й екологічного менеджменту у єдину структуру управління ризиками. Україна, поступово імплементуючи норми ЄС у сфері промислової екології, наближається до зазначеного підходу, проте досі відсутнє чітке методологічне та термінологічне визначення самої системи еколого-виробничої безпеки як цілісної категорії.

Одним із ключових елементів такої системи є інтегрований дозвіл (ІДД) – правовий механізм, який визначає допустимі рівні впливів підприємства на довкілля за принципом «один об'єкт – один дозвіл». Цей інструмент, запроваджений директивами ЄС, зокрема Директивою 2010/75/ЄС щодо промислових викидів, дозволяє поєднати вимоги екологічного законодавства, охорони праці та технологічних стандартів у єдиній системі контролю [2].

Отже, система еколого-виробничої безпеки – це не тільки сукупність технічних й організаційних заходів, а й парадигма відповідального управління ризиками, що ґрунтується на наукових принципах системного аналізу, комп'ютерних моделей, цифрового моніторингу, екологічного права та соціальної відповідальності бізнесу.

Сформулювати єдиний підхід до цього поняття – означає створити фундамент для переходу української промисловості до сучасних європейських стандартів екологічного управління, інтегрованого контролю, моніторингу й оцінки ризиків.

Мета роботи

Метою дослідження є комплексне дослідження поняття та структури системи еколого-виробничої безпеки як інтегрованої моделі управління впливами промислового виробництва на довкілля, здоров'я працівників і населення.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати теоретико-методологічні засади формування системи еколого-виробничої безпеки;
- вдосконалити методи оцінки ризиків у системі HES;
- обґрунтувати використання математичного та комп'ютерного моделювання процесів у системі еколого-виробничої безпеки;
- виконати синтез єдиного підходу: інтеграція ІДД, HES і цифрового моніторингу.

Основна частина

Поняття «еколого-виробнича безпека» (ЕВБ) формується на перетині декількох наукових напрямів – екології, інженерної безпеки, гігієни праці, техногенної безпеки, економіки природокористування та соціології ризику. На відміну від традиційного підходу до охорони праці чи промислової екології, СЕВБ розглядає виробництво та довкілля як єдину систему, де ризики для здоров'я, природи та технологічних процесів взаємопов'язані.

Історично концепція ЕВБ почала розвиватися наприкінці ХХ століття, коли відбулося усвідомлення того, що екологічні наслідки виробництва не можуть розглядатися відокремлено від безпеки працівників і населення навколишніх громад. В основі цього підходу лежить системне мислення, яке ґрунтується на принципі «системи екологічно-виробничої безпеки». Ця система включає технологічні процеси, людей, природні компоненти, матеріальні ресурси, енергетичні потоки, інформаційні канали та соціальні зв'язки, які взаємодіють у реальному часі.

Розвиток концепції ЕВБ значною мірою пов'язаний із міжнародною системою НЕС, яка сформувалася у 1970–1980-х роках у нафтовидобувній, хімічній і енергетичній промисловості. Саме тоді було вперше визнано, що управління безпекою праці, промисловими ризиками й екологічними наслідками має здійснюватись у єдиній системі, а не у вигляді трьох окремих підрозділів. Поступово ця модель трансформувалася у глобальні стандарти – ISO 14001 (екологічний менеджмент), ISO 45001 (охорона праці) та ISO 31000 (управління ризиками), які на сьогодні формують основу для системи еколого-виробничої безпеки у більшості розвинених країн.

В Україні до сьогодні не існує єдиного нормативного визначення зазначеної категорії. На основі синтезу відомих підходів [3, 4] пропонується таке авторське визначення: «Система еколого-виробничої безпеки – це багаторівнева інтегрована система державного, корпоративного та суспільного управління, спрямована на прогнозування, запобігання та мінімізацію негативного впливу промислової діяльності на людину та довкілля шляхом застосування принципів сталого розвитку, інтегрованого ризик-менеджменту, інноваційних технологій і цифрового моніторингу». Таке визначення відображає не тільки структурну складність системи, а й її динамічну сутність – ЕВБ як процес постійного вдосконалення та навчання.

Основні принципи системного підходу до ЕВБ включають:

- 1) Інтегрованість – об'єднання технічних, екологічних, соціальних і правових аспектів у єдину систему управління.
- 2) Превентивність – орієнтація на попередження ризиків, а не тільки на ліквідацію наслідків.
- 3) Ітеративність і адаптивність – безперервне вдосконалення системи шляхом моніторингу, аналізу, цифровізації та навчання.
- 4) Прозорість і відкритість даних – доступ громадськості й органів державної та місцевої влади до інформації щодо впливів підприємств на довкілля.
- 5) Відповідальність і сталий розвиток – поєднання економічних інтересів виробництва з екологічними обмеженнями та соціальними цінностями.

Методологічно СЕВБ реалізується шляхом циклу PDCA (Plan-Do-Check-Act), запозиченого із систем менеджменту якості, що дозволяє забезпечити постійне вдосконалення процесів управління ризиками. У межах цього циклу:

- на етапі планування (Plan) визначаються джерела ризиків, параметри моніторингу, нормативні обмеження;
- на етапі виконання (Do) впроваджуються технічні, організаційні й екологічні заходи;
- на етапі контролю (Check) здійснюється оцінка результатів, аудит, аналіз даних;
- на етапі корекції (Act) – оновлення політик, інструкцій, технологічних рішень відповідно до результатів аналізу.

Інтегрований доквіллевий дозвіл – це ключовий правовий інструмент, який забезпечує формування єдиного регуляторного поля для всіх аспектів екологічної безпеки підприємства. Його сутність полягає у встановленні гранично допустимих впливів на довкілля на основі принципу найкращих доступних технологій (BAT – Best Available Techniques).

ІДД забезпечує взаємозв'язок між нормативними актами у галузі охорони атмосферного повітря, водних ресурсів, поводження з відходами, хімічної безпеки й охорони праці. На практиці це означає, що підприємство отримує єдиний дозвіл, який охоплює всі аспекти його діяльності, а не окремі дозволи для кожного виду впливу. Це суттєво спрощує адміністрування, підвищує прозорість і дозволяє державі здійснювати інтегрований моніторинг.

Для СЕВБ ІДД є базовим компонентом, який задає нормативно-правові рамки ризик-менеджменту. Саме на його основі формуються екологічні індикатори, вимоги до моніторингу, критерії для оцінки результативності заходів HES. Отже, інтегрований доквіллевий дозвіл стає юридичним ядром інтегрованої системи еколого-виробничої безпеки.

Система HES є концептуальною моделлю, яка поєднує три ключові складові:

- health (здоров'я) – захист працівників від небезпечних факторів виробничого середовища;
- environment (довкілля) – зменшення негативного впливу на природу;
- safety (безпека) – запобігання аваріям, пожежам, техногенним катастрофам.

У контексті ЕВБ зазначені елементи інтегруються у єдину багаторівневу систему управління, яка включає:

- стратегічний рівень – політика сталого розвитку підприємства, ESG-зобов'язання, корпоративна звітність;
- тактичний рівень – стандарти ISO, ІДД, внутрішні регламенти, програми моніторингу;
- операційний рівень – конкретні технологічні процеси, технічний контроль, дії персоналу.

Важливо, що сучасні системи HES поступово доповнюються цифровими технологіями – HES 4.0, які включають автоматизовані сенсорні мережі, штучний інтелект для прогнозування аварій, цифрові двійники виробництв, які дозволяють проводити моделювання сценаріїв небезпек у реальному часі [5].

Ризик у контексті еколого-виробничої безпеки визначається як імовірність настання небажаної події, помножена на тяжкість її наслідків для здоров'я людини, довкілля чи технологічного процесу. Цей підхід поєднує ймовірнісну, економічну й екологічну інтерпретації ризику, що робить його універсальним показником ефективності системи HES.

Згідно з міжнародними стандартами ISO 31000 (управління ризиками) й ISO 45001 (охорона праці), управління ризиками – це систематичний процес виявлення, аналізу, оцінки та контролю ризиків із метою мінімізації шкоди або її попередження.

У системі HES цей процес має три виміри:

- людський (захист персоналу, психофізіологічна надійність);
- технічний (надійність технологій, обладнання, енергосистем);
- екологічний (стійкість природного середовища до техногенних впливів).

Складова ризику ЕВБ має бути кількісно оціненою, що дозволяє створити спільну мову управління для інженерів, екологів, економістів, юристів і менеджерів. Це особливо важливо для інтегрованих систем типу HES, де управління ризиками стає ядром інтердисциплінарної взаємодії.

Методи оцінки ризиків у системі HES поділяються на якісні, напівкількісні та кількісні. Їх вибір залежить від типу небезпеки, доступності даних, рівня невизначеності та цілей дослідження.

Математичне моделювання є основним інструментом кількісної оцінки ризиків у системі HES. Його суть полягає у визначенні функцій імовірності настання подій, інтенсивності відмов, розподілу небезпечних концентрацій шкідливих речовин тощо.

Для виробничих систем доцільно застосовувати багатофакторні моделі, які враховують одночасно декілька груп ризиків:

$$R = f(E, T, H, S), \quad (1)$$

де E – екологічні фактори (викиди, забруднення, кліматичні впливи), T – технічні (знос обладнання, відмови систем), H – людські (поведінкові помилки, рівень навчання), S – соціально-організаційні (система управління, культура безпеки).

Кожен із цих параметрів може бути поданий через підмножину статистичних змінних, що дозволяє побудувати мультиагентну модель ризику. Для складних систем – таких як гірничодобувні комбінати, металургійні заводи або енергетичні блоки – використовуються методи Монте-Карло, Баєсівського аналізу, нейронних мереж, які дозволяють прогнозувати ризики за великої кількості невизначеностей.

У СЕВБ розрізняють два основних класи ризиків – екологічні (впливи на довкілля) та виробничі (ризики для працівників і технологій). Хоча вони мають різну природу, методи їхнього аналізу взаємопов'язані.

Екологічний ризик визначається як імовірність того, що вплив виробничих процесів перевищить гранично допустимі норми, спричинивши деградацію екосистеми чи шкоду здоров'ю працівника. Для його оцінки використовують: моделі поширення забруднюючих речовин у повітрі та воді (Гаусові та дисперсійні моделі); розрахунок зон ураження під час аварій (моделі CFD); індикаторні системи (наприклад, індекс екологічної безпеки – ЕНІ).

Виробничий ризик пов'язаний із технічними відмовами, пожежами, вибухами, травмуваннями персоналу. Його аналіз передбачає: визначення частоти небезпечних подій (λ , відмов/год); побудову сценаріїв розвитку аварії (дерева подій); розрахунок інтегрального коефіцієнта ризику R_{int} , що поєднує частоту та тяжкість події.

Впровадження результатів оцінки ризику у практику здійснюється шляхом Risk-Based Thinking – концепції, за якою всі управлінські рішення приймаються з урахуванням ризиків і можливостей. Це вимагає побудови карти ризиків (Risk Map) підприємства з поділом за категоріями – стратегічні, технологічні, екологічні, соціальні, інформаційні.

Оцінка ризиків є ключовим елементом у побудові інтегрованої системи управління типу HES. У межах інтегрованого довікільевого дозволу вона використовується для:

- визначення гранично допустимих технологічних параметрів (BAT-AELs – emission levels);
- обґрунтування планів екологічного моніторингу;
- вибору методів контролю аварійних ситуацій;
- формування звітності за принципом Risk-Based Compliance.

На практиці це означає, що підприємство має не тільки задекларувати дотримання норм, а й кількісно довести прийнятність ризиків для довілля та здоров'я. У ЄС подібні вимоги закріплені у директивах IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) й IED (Industrial Emissions Directive) [6, 2]. В Україні цей підхід поступово імплементується через Закон «Про інтегрований довікільевий дозвіл» (2022 р.) і відповідні підзаконні акти [7].

Отже, методи оцінки ризиків є серцевиною системи HES, яка забезпечує перехід від декларативного до аналітичного управління безпекою. Це дозволяє створювати адаптивні моделі управління, де рішення ґрунтуються на даних, прогнозах і цифровому моніторингу, а не тільки на формальних процедурах.

Побудова ефективної системи еколого-виробничої безпеки потребує науково обґрунтованої основи для аналізу, прогнозування й управління ризиками. Одним із ключових інструментів, що забезпечує таку основу, є математичне та комп'ютерне моделювання, яке дозволяє відтворити динаміку складних природно-техногенних систем, оцінити поведінку небезпечних процесів і розробити оптимальні стратегії реагування.

Математичне моделювання у контексті ЕВБ ґрунтується на системному підході, який розглядає виробництво, довілля та людину як взаємопов'язані підсистеми єдиної соціо-техно-природної системи. Це дає змогу не тільки описувати фізико-хімічні процеси у середовищі, а й урахувати соціально-економічні наслідки й управлінські рішення, які впливають на рівень ризику.

Математичне моделювання процесів у системі еколого-виробничої безпеки спирається на рівняння неперервності, руху, енергії та масообміну, які відображають поведінку речовини у просторі та часі. Ці рівняння описують закономірності утворення, поширення та розсіювання шкідливих речовин, а також взаємодію техногенних факторів із природними компонентами середовища.

Для кількісного опису ризиків застосовуються моделі детерміністичного та стохастичного типів. Детерміністичні моделі дозволяють отримати прогностичні сценарії за відомих вихідних параметрів, тоді як стохастичні

враховують невизначеність процесів і ймовірнісний характер подій. Їх поєднання забезпечує комплексну оцінку надійності виробничої системи та її впливу на довкілля.

Комп'ютерні технології обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics, CFD) стали одним із найкращих інструментів сучасної екологічної інженерії [8]. Вони дозволяють розраховувати параметри руху газових і рідинних потоків у складних геометріях, моделювати поширення домішок у повітрі, воді чи ґрунті, враховуючи турбулентність, температурні градієнти, вплив рельєфу й архітектури промислових споруд [9–11].

У СЕВБ CFD-моделі виконують кілька функцій:

- оцінку зон потенційного перевищення гранично допустимих концентрацій;
- аналіз ефективності вентиляційних і пилоосаджувальних систем;
- прогнозування наслідків аварійних викидів і пожеж;
- валідацію даних екологічного моніторингу.

Отже, CFD-аналіз стає складовою проактивного управління безпекою, що дозволяє реагувати на можливі загрози ще до їхнього виникнення.

Сучасний напрям цифровізації безпеки реалізується через концепцію цифрового двійника (Digital Twin) – віртуальної копії виробничого об'єкта, що відображає його поточний стан у режимі реального часу.

Поєднання цифрового двійника з моделями ризиків, CFD-розрахунками та системами моніторингу створює нову парадигму управління ЕВБ – інтелектуальну систему самонавчального управління ризиками. Це забезпечує безперервне вдосконалення процесів за принципом PDCA, підвищуючи рівень надійності, прозорості й адаптивності системи.

Побудова єдиного підходу до управління еколого-виробничою безпекою ґрунтується на необхідності поєднання трьох системних рівнів: нормативно-правового (інтегрований дозвіл), управлінського (Health, Environment, Safety) і технологічного (цифрові інструменти моніторингу та моделювання).

Така інтеграція дозволяє усунути розрив між регуляторними вимогами, практичним управлінням ризиками та реальними технічними процесами на підприємствах.

Інтегрована система еколого-виробничої безпеки має тривірневу архітектуру:

1) Нормативний рівень (ІДД) – формує базові екологічні вимоги, критерії найкращих доступних технологій (BAT), визначає межі викидів і стандарти звітності.

2) Управлінський рівень (HES) – забезпечує реалізацію принципів ризик-орієнтованого менеджменту відповідно до міжнародних стандартів ISO 14001, ISO 45001, ISO 31000, а також включає механізми внутрішнього аудиту, моніторингу та навчання персоналу.

3) Цифровий рівень – забезпечує автоматизований моніторинг, аналітику даних і підтримку прийняття рішень за допомогою цифрових двійників, систем SCADA й інструментів Big Data.

Поєднання цих рівнів створює замкнутий цикл управління – від ідентифікації ризиків до коригувальних дій і постійного вдосконалення системи.

Реалізація інтегрованого підходу відбувається шляхом поетапної послідовності дій:

- ідентифікація небезпек і побудова карт ризику;
- кількісна оцінка ризиків за допомогою математичних і комп'ютерних моделей;
- порівняння отриманих результатів із нормативними параметрами ІДД;
- розроблення й упровадження управлінських заходів у рамках HES;
- моніторинг ефективності дій і формування звітності за принципом PDCA.

Отже, система набуває адаптивного характеру, що вможливорює оперативно реагувати на зміну технологічних умов і стану довкілля. Впровадження інтегрованого підходу сприяє підвищенню ефективності управління ризиками, оптимізації витрат на екологічний контроль, забезпеченню прозорості звітності та підвищенню довіри з боку регуляторів і громадськості. Крім того, така система створює підґрунтя для реалізації корпоративних стратегій ESG (Environmental, Social, Governance), що відповідають Цілям сталого розвитку ООН і вимогам європейського екологічного законодавства.

Висновки

Система еколого-виробничої безпеки у сучасному розумінні є інтегрованою багаторівневою структурою, яка поєднує нормативно-правові, управлінські та технологічні інструменти. Її ефективне функціонування ґрунтується на принципах системності, превентивності, адаптивності та прозорості.

У результаті виконаного комплексного дослідження можна зробити висновок, що:

1) Еколого-виробнича безпека є невід'ємною складовою сталого розвитку виробництва, яка об'єднує функції управління ризиками, екологічного контролю й охорони праці.

2) Математичне та комп'ютерне моделювання слугує універсальним інструментом оцінки ризиків, прогнозування сценаріїв небезпек і планування заходів мінімізації впливу.

3) Інтеграція ІДД, HES і цифрових технологій формує єдиний підхід до управління безпекою, заснований на безперервному циклі вдосконалення PDCA.

4) Запровадження цифрових двійників і CFD-моделей у практику дозволяє підвищити точність оцінки ризиків і знизити рівень невизначеності у прийнятті рішень.

5) Єдиний підхід до еколого-виробничої безпеки створює основу для гармонізації національної системи управління безпекою з європейськими екологічними директивами.

Подальший розвиток досліджень має бути спрямований на створення інтелектуальних систем управління ризиками, які використовують штучний інтелект і машинне навчання під час роботи з великими масивами даних для прогнозування та мінімізації загроз у режимі реального часу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

- 1) Hajipour, V., Amouzegar, H., Gharaei, A., Abarghoei, M.S.G., & Ghajari, S. (2021). An integrated process-based HSE management system: A case study. *Safety Science*, 133, 104993. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104993>
- 2) Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (recast) (Text with EEA relevance). European Parliament. URL : <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>
- 3) Poliova, N., & Andrushkevych, N. (2025). Theoretical aspects of environmental safety management at industrial enterprises. *City development*, (2(06)), 120–126. <https://doi.org/10.32782/city-development.2025.2-16>
- 4) Biliavska, Yu., & Minakov M. (2020). Formation of environmental management at the enterprise. *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series Economic Sciences*, 37, 24–28. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2020-37-4>
- 5) Kien, Dang Trung, Colcha Ortiz, Raquel Virginia, Özker, Ahmet Niyazi, Pozo Safla, Edwin Rodolfo, Misnan, Mohd Saidin, & Phorah, Kokisa (2025). Digital Twin Technology for Real-Time Risk Management in Industrial IOT Systems. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. 10(53s), 1124–1133.
- 6) Directive 2008/1/EC of the European Parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control (Codified version) (Text with EEA relevance). European Parliament. URL : <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/1/oj>
- 7) On integrated prevention and control of industrial pollution, Law of Ukraine, Specification on July 16, 2024 № 3855-IX. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3855-20#Text>
- 8) Pantusheva, M., Mitkov, R., Hristov, P. O., & Petrova-Antonova, D. (2022). Air Pollution Dispersion Modelling in Urban Environment Using CFD: A Systematic Review. *Atmosphere*, 13(10), 1640. <https://doi.org/10.3390/atmos13101640>
- 9) Lashko, Y., Sukach, S., Laktionov, I., Chencheva, O., Rieznik, D., & Kortsova, O. (2025). Predictive Mathematical and Computer Model for Determining Harmful Effects of Dust Pollution on the Environment and Workers. *Baltic Journal of Modern Computing*, 13(2), 436–452. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2025.13.2.08>
- 10) Lashko, Y., Chencheva, O., Levchenko, L., Myshchenko, I., & Bolibruxh, B. (2025). Evaluation of the aerological condition during open-pit mining operations based on three-dimensional models of quarries. *Advanced Information Systems*, 9(2), 18–24. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.2.03>
- 11) Lashko, Y., Chencheva, O., Laktionov, I., Rieznik, D., & Halchenko, N. (2024). Mathematical and Computer Simulation of the Process of Movement of Respirable Dust Particles in the Working Area. *Baltic Journal of Modern Computing*, 12(3), 270–285. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2024.12.3.04>

Стаття надійшла до редакції 18.12.25, надійшла після рецензування 30.01.26, прийнята 04.03.26

The article was received 18.12.25, received after revision 30.01.26, accepted 04.03.26

Лашко Євгеній Євгенович

кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Адреса робоча: вул. Університетська, 20, м. Кременчук, Україна, 39600

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9691-4648> e-mail: evgeny.lashko.lj@gmail.com

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 621.396:004.8:004.942

Oleksandr Trofymchuk, Corresponding Member of the NASU, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space

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

Vasyl Trysnyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor

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

Volodymyr Dziuba, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9576-814X> **e-mail:** navvon@ukr.net

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

TECHNOLOGIES FOR CREATING INTELLIGENT RADAR LOCATION AND TECHNICAL INTELLIGENCE SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF RADIO ELECTRONIC COUNTERMEASURES

Abstract. *The work is devoted to solving the urgent scientific and applied problem of creating intelligent radar and technical intelligence systems capable of operating effectively in conditions of active electronic countermeasures, high signal density, multi-beam propagation and targeted interference. The article considers a comprehensive approach to building such systems based on the integration of software-defined radio technologies (SDR), cognitive spectrum management methods, adaptive signal processing and deep machine learning algorithms.*

A multi-level architecture of an intelligent system is proposed, which includes a sensor level of signal collection and pre-processing, an analytical level of spectral-temporal analysis and classification, and a cognitive level of decision-making and adaptation of work parameters. The application of neural network models for automated detection of radiation types, reinforcement learning algorithms for dynamic frequency resource management and multi-position methods for localization of radio radiation sources using data fusion procedures is justified.

It is shown that the integration of these technologies provides a significant increase in the resistance of systems to broadband and pulsed interference, a decrease in the reaction time to changes in the electronic environment, an increase in the accuracy of signal classification and an increase in the reliability of determining the coordinates of radiation sources. The results obtained form a scientific and methodological basis for the creation of new generation technical intelligence systems, oriented towards application in conditions of modern military and hybrid threats.

Keywords: *radar, technical intelligence, SDR, cognitive radio, electronic warfare, neural networks, adaptive spectrum management, multi-position localization.*

О.М. Трофимчук, В.М. Триснюк, В.А. Дзюба

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

ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ РАДІОЛОКАЦІЇ ТА ТЕХНІЧНОЇ РОЗВІДКИ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ПРОТИДІЇ

***Анотація.** Роботу присвячено розв'язанню актуального науково-прикладного завдання створення інтелектуальних систем радіолокації та технічної розвідки, здатних ефективно функціонувати в умовах активної радіоелектронної протидії, високої щільності сигналів, багатопроменевого поширення та цілеспрямованих перешкод. У статті розглянуто комплексний підхід до побудови таких систем на основі інтеграції програмно-визначених радіотехнологій (SDR), методів когнітивного управління спектром, адаптивної обробки сигналів та алгоритмів глибокого машинного навчання.*

Запропоновано багаторівневу архітектуру інтелектуальної системи, що включає сенсорний рівень збору та попередньої обробки сигналів, аналітичний рівень спектрально-часового аналізу й класифікації та когнітивний рівень прийняття рішень і адаптації параметрів роботи. Обґрунтовано застосування нейронних мереж для автоматизованого виявлення типів випромінювання, алгоритмів підкріплювального навчання для динамічного управління частотним ресурсом та багатопозиційних методів локалізації джерел радіовипромінювання із використанням процедур злиття даних.

Показано, що інтеграція зазначених технологій забезпечує суттєве підвищення стійкості систем до широкосмугових і імпульсних завад, зменшення часу реакції на зміну радіоелектронної обстановки, підвищення точності класифікації сигналів та зростання достовірності визначення координат джерел випромінювання. Отримані результати формують науково-методичну основу для створення систем технічної розвідки нового покоління, орієнтованих на застосування в умовах сучасних воєнних і гібридних загроз.

***Ключові слова:** радіолокація, технічна розвідка, SDR, когнітивне радіо, радіоелектронна боротьба, нейронні мережі, адаптивне управління спектром, багатопозиційна локалізація.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.133-140>

Вступ

Сучасний розвиток засобів радіоелектронної боротьби, мобільних передавальних комплексів, безпілотних систем і мережеских структур управління призвів до істотного ускладнення електромагнітного середовища. Радіочастотний спектр перетворився на простір активного протистояння, де поряд із корисними сигналами функціонують широкосмугові та вузькосмугові перешкоди, сигнали маскування, ретранслятори з динамічною перебудовою частоти, а також засоби імітації та дезінформації.

У таких умовах класичні системи радіолокації та технічної розвідки, що базуються на статичних алгоритмах оброблення сигналів, демонструють обмежену ефективність. Фіксовані порогові процедури виявлення сигналів, традиційні методи пеленгації та неадаптивні схеми фільтрації не забезпечують необхідного рівня стійкості при низькому співвідношенні сигнал/шум і за наявності активного подавлення [1].

Підвищення вимог до швидкодії, автономності, точності класифікації та локалізації джерел випромінювання зумовлює необхідність переходу до інтелектуальних систем, здатних до самонавчання, аналізу великих обсягів спектральної інформації та адаптивного управління параметрами власної роботи. Саме поєднання програмно-визначених радіотехнологій, алгоритмів штучного інтелекту та когнітивного управління спектром створює передумови для формування систем нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток концепції когнітивного радіо пов'язаний із роботами J. Mitola, який запропонував ідею радіосистеми, здатної до самоусвідомлення спектрального середовища, та S. Haykin, який сформулював когнітивний цикл адаптації. Подальші дослідження Zhou, Wang, Steyn, Pratt були спрямовані на застосування алгоритмів машинного навчання для динамічного розподілу спектра та протидії перешкодам.

У сфері багатопозиційної локалізації активно розвивалися методи оцінювання стану на основі фільтра Калмана, алгоритмів триангуляції, TDOA та AOA, а також процедури злиття даних [2, 3].

Українські науковці, зокрема О.М. Попов та С.В. Зайцев, досліджували інтеграцію SDR-технологій, алгоритмів Q-навчання та нейронних мереж у задачах радіомоніторингу та управління частотним ресурсом.

Разом з тим, проблема комплексного поєднання когнітивного управління, глибокого навчання та багатопозиційної локалізації в умовах активної радіоелектронної протидії потребує систематизації та розширення.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення технологічних принципів створення інтелектуальних систем радіолокації та технічної розвідки, здатних забезпечити адаптивне виявлення, класифікацію та локалізацію джерел радіовипромінювання в умовах активної радіоелектронної боротьби.

Об'єктом дослідження є процес багатопозиційної локалізації джерел радіосигналів із використанням програмно-керованих приймачів та нейромережових модулів у складних умовах електромагнітного середовища.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сучасна інтелектуальна система радіолокації та технічної розвідки розглядається як складна багаторівнева інформаційно-технічна система, що функціонує в умовах невизначеності, завад та навмисного впливу. Основною особливістю запропонованого підходу є інтеграція апаратно-програмних засобів збору сигналів із алгоритмічними модулями аналізу та прийняття рішень, що дозволяє забезпечити безперервну адаптацію до змін радіоелектронної обстановки.

Архітектурно система будується за принципом розподіленої мережі сенсорів, об'єднаних єдиним інформаційним простором. Сенсорний рівень забезпечує широкосмугове сканування спектра у заданих діапазонах частот із використанням програмно-визначених радіомодулів. Гнучкість SDR-платформ дозволяє змінювати параметри прийому, фільтрації та демодуляції без фізичної перебудови апаратури, що особливо важливо в умовах частотного маневрування противника.

Первинна обробка сигналів включає процедури нормалізації, компенсації апаратних похибок, усунення постійної складової, а також формування спектрально-часових представлень. На цьому етапі формується інформаційна база для подальшого інтелектуального аналізу.

Аналітичний рівень системи реалізує глибокий аналіз спектральних характеристик сигналів. Застосування згорткових нейронних мереж дозволяє автоматизувати процес класифікації типів випромінювання, розпізнавати сигнали різної модуляції, виявляти аномальні структури спектра та відокремлювати корисні сигнали від перешкод. Важливою перевагою нейромережевого підходу є здатність моделі навчатися на великих масивах даних і виявляти приховані закономірності, недоступні для класичних алгоритмів.

Особлива увага приділяється задачі виявлення активного подавлення. Для цього аналізуються статистичні характеристики спектра, ширина смуги перешкоди, її енергетичний розподіл та часові особливості. Інтелектуальні модулі дозволяють визначати тип завади – шумову, імпульсну, псевдовипадкову або спрямовану – та автоматично формувати стратегію протидії.

Когнітивний рівень системи відповідає за прийняття рішень щодо перебудови параметрів роботи. Алгоритми підкріплювального навчання формують функцію корисності для кожного можливого частотного діапазону з урахуванням рівня завад, стабільності каналу та історії використання [5]. Система накопичує досвід, що дозволяє зменшувати час реакції на зміну обстановки та підвищувати ефективність використання спектра.

Багатопозиційна локалізація джерел радіовипромінювання реалізується на основі розподілених вимірювальних пунктів. Кожен сенсор передає оцінки параметрів сигналу до центрального аналітичного вузла, де виконується злиття даних. Процедура злиття враховує часові затримки, фазові зсуви, геометрію розташування приймачів та можливі іоносферні спотворення.

Інтелектуальна складова локалізації полягає у використанні нейромережевих моделей для корекції систематичних похибок і компенсації мультипасних ефектів. Це дозволяє забезпечити стабільність визначення координат навіть за часткової втрати сенсорів або при наявності активного подавлення.

Важливим аспектом є забезпечення відмовостійкості системи. Архітектура передбачає можливість децентралізованої обробки та дублювання ключових функцій. У випадку виходу з ладу окремих вузлів система переходить у режим деградації з мінімальною втратою функціональності [6].

Експериментальне моделювання показало, що інтеграція когнітивного управління та глибокого навчання забезпечує значне підвищення точності класифікації сигналів і зменшення часу реакції системи. Крім того, використання процедур злиття даних підвищує достовірність локалізації джерел випромінювання.

Для побудови інтелектуальної системи локалізації було застосовано чотирирівневий підхід, який охоплює архітектуру приймальних модулів, нейромережеву обробку, адаптивний модуль злиття даних (fusion) та процедури розширення й варіативності навчальної вибірки (аугментацію даних). Така структуризація дозволяє забезпечити поетапну обробку сигналів із поступовим підвищенням рівня інтелектуалізації та точності оцінювання координат джерела випромінювання.

На першому рівні система базується на програмно-визначених приймачах, реалізованих на платформах SDR, які здійснюють багатоканальний збір спектральної інформації. У процесі прийому фіксуються ключові параметри сигналу, зокрема амплітудні характеристики, міжканальна фазова різниця (IPD), напрям надходження сигналу (DoA) та часові затримки прибуття (TDoA). Отримані вимірювання передаються через захищений канал зв'язку до центрального обчислювального вузла, де проходять попередню синхронізацію, нормалізацію та формування структурованого набору ознак для подальшого аналізу.

Другий рівень передбачає використання глибинної згорткової нейронної мережі, побудованої на архітектурі ResNet із інтегрованими механізмами уваги (attention). Наявність залишкових з'єднань забезпечує ефективне навчання глибоких моделей без деградації градієнтів, що дозволяє детально аналізувати просторово-частотні особливості сигналів. Механізм attention, у свою чергу, спрямовує обчислювальні ресурси на найбільш інформативні компоненти спектра, підвищуючи селективність моделі та її здатність працювати в умовах обмежених апаратних ресурсів, зокрема на edge-платформах. Поєднання залишкових структур і механізмів уваги створює баланс між обчислювальною ефективністю та високою точністю оцінювання.

На третьому рівні реалізується адаптивний модуль злиття даних, який інтегрує результати нейромережевої обробки з класичними алгоритмами оцінювання стану. Зокрема, застосовується модифікований Extended Kalman Filter (EKF), що здійснює корекцію вихідних оцінок нейромережі з урахуванням поточного стану радіосигналу, включаючи значення співвідношення сигнал/шум (SNR), напрям приходу (AoA) та часові затримки (TDoA). Така комбінована обробка дозволяє зменшити вплив випадкових похибок і нестабільності вимірювань, забезпечуючи більш точне та стійке визначення координат джерела випромінювання в динамічних умовах радіоелектронної протидії. Формально процес оцінювання можна описати рівнянням:

$$x_k = x_{k-1} + K_k(z_k - h(x_{k-1})), \quad (1)$$

де x_k – оцінка вектора стану на кроці k , K – матриця коефіцієнтів Калмана, z_k – вектор вимірювань, h – нелінійна модель вимірювань.

Подібно до гібридних систем типу EKF+ENN, що застосовуються у задачах локалізації в мережах 5G, запропонований підхід поєднує класичні методи оцінювання стану з інтелектуальними алгоритмами машинного навчання, що забезпечує підвищену точність визначення координат навіть за умов інтенсивного шумового впливу, нестабільності каналу зв'язку та швидкої зміни параметрів середовища. Така інтеграція дозволяє компенсувати недоліки кожного з методів окремо: нейромережева модель забезпечує гнучке апроксимування нелінійних залежностей між вимірними параметрами сигналу та координатами джерела, тоді як розширений фільтр Калмана виконує статистичну стабілізацію результатів і згладжування випадкових коливань оцінок у часі.

Четвертий етап реалізації системи пов'язаний із підготовкою навчальних даних та формуванням репрезентативної вибірки для тренування нейромережевої моделі. Враховуючи складність реального радіоелектронного середовища, було застосовано методи аугментації даних, що дозволяють розширити навчальний простір без необхідності масштабного натурального експерименту. Зокрема, у процесі формування вибірки до початкових сигналів вводилися синтетичні фазові зсуви, адитивні та мультиплікативні шумові компоненти, а також моделювалися ефекти багатопробеневого поширення й відбиття сигналів від перешкод. Подібні підходи широко використовуються у задачах indoor sound source localization (SSL) та в алгоритмах позиціонування в мережах 5G, де необхідно відтворити складну структуру радіоканалу для підвищення узагальнювальної здатності моделі [7, 8].

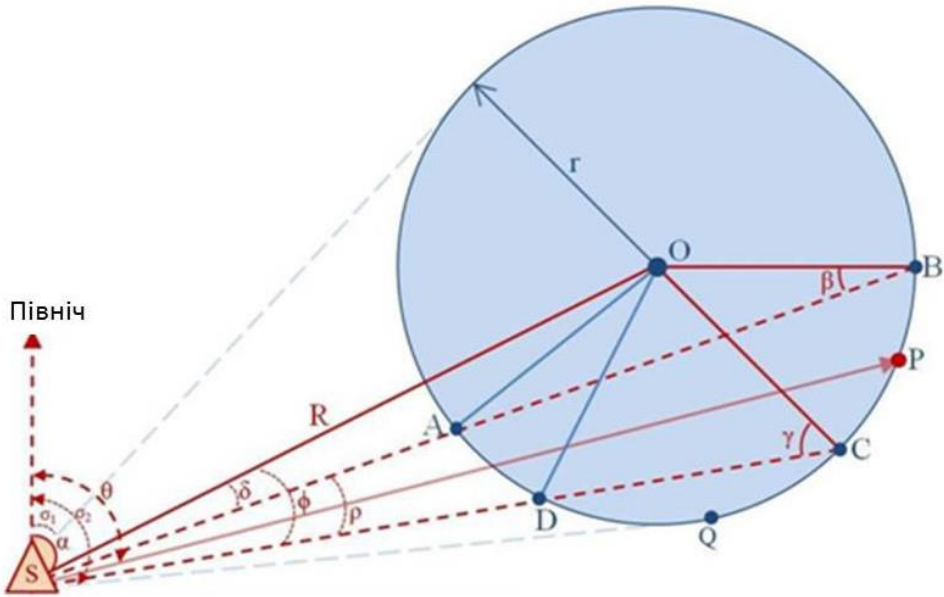


Рис. 1. Схематичне зображення зони перетину кола амплітудної похибки з сектором пеленгації

Застосування аугментації дозволило сформувати більш реалістичний навчальний набір, що відображає можливі сценарії функціонування системи в умовах радіоелектронної протидії. Це, у свою чергу, сприяло підвищенню стійкості нейромережевої моделі до невизначеності та зменшенню ризику перенавчання.

У процесі моделювання багатопозиційної системи місцевизначення джерел радіовипромінювання було реалізовано комбінований підхід, який поєднує амплітудний аналіз із використанням напрямкової інформації (рис. 1). Така інтеграція дозволяє враховувати як енергетичні характеристики сигналу, так і геометричні співвідношення між приймальними пунктами та джерелом випромінювання.

Для дослідження ефективності алгоритмів було сформовано синтетичний датасет, що містить понад 10 000 варіантів просторового розташування джерел, відповідних значень амплітуд, кутів приходу та часових затримок. Генерація даних здійснювалася з урахуванням геометрії розташування

сенсорів, характеристик передавального тракту та варіацій параметрів шуму. Такий підхід дозволив створити контрольоване середовище для перевірки точності роботи алгоритмів та оцінювання впливу різних факторів на результати локалізації.

Для обробки сформованого набору даних було розроблено згорткову нейронну мережу, адаптовану до роботи з багатовимірними спектрально-просторовими ознаками. Архітектура мережі передбачає послідовність згорткових блоків із нелінійними функціями активації та шарами нормалізації, що забезпечує стабільність навчання та ефективне виділення ключових характеристик сигналу. Результати моделювання показали, що запропонована CNN-модель дозволяє досягти високої точності координатного визначення навіть у сценаріях зі зниженим співвідношенням сигнал/шум та частковою деградацією окремих сенсорних каналів.

Таким чином, поєднання амплітудного та напрямкового аналізу, нейромережевої обробки та адаптивного злиття даних створює комплексний механізм оцінювання координат, який демонструє підвищену стійкість, масштабованість і точність у порівнянні з традиційними методами триангуляції або пеленгації.

Висновки

Розроблено комплексний підхід до створення інтелектуальних систем радіолокації та технічної розвідки, що поєднує SDR-технології, когнітивне управління спектром, нейромережеві методи класифікації та багатопозиційні процедури локалізації.

Запропонована архітектура забезпечує адаптивність до змін радіоелектронної обстановки, стійкість до активного подавлення та підвищену точність визначення параметрів джерел випромінювання.

Отримані результати можуть бути використані при створенні систем технічної розвідки нового покоління, орієнтованих на функціонування в умовах сучасних воєнних конфліктів та гібридних загроз.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Signalov, Yu. I. (2020). Teoriia ta praktyka RER [Theory and practice of electronic intelligence]. Kharkiv: KhNURE, 168, 85-88 (in Ukrainian).
2. Varlamov, I. D., & Hatsenko, S. S. (2014). Model informatsiinykh potokiv u suputnykovykh systemakh [Model of information flows in satellite systems]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, 4, 47-56 (in Ukrainian).
3. Tymoshenko, V. A. (2018). Nechitki systemy ta shtuchnyi intelekt [Fuzzy systems and artificial intelligence]. Kyiv: Naukova dumka, 320 (in Ukrainian).
4. Havryliuk, A. S. (2022). Systemy tekhnichnoi rozvidky v suchasnomu boiu [Systems of technical intelligence in modern combat]. *Zbirnyk naukovykh prats NUOU* (in Ukrainian).
5. Melnyk, V. P. (2018). Metody pidvyshchennia zavadostiikosti suputnykovykh kanaliv zviazku v diapazonakh C ta Ku [Methods of increasing noise immunity of satellite communication channels in C and Ku bands]. *Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska Politekhnikha"*, 895, 102-108 (in Ukrainian).
6. Trysnyuk, V., Yehorov, V., Tymchuk, S., & Trysnyuk, T. (2022). Geo-information system for ensuring the functioning of the VHF range radio direction finding network. *Proceedings of ITTAP 2022*, 117-123.

7. Maral, G., & Bousquet, M. (2017). Satellite communications systems: Systems, techniques and technology. Hoboken: Wiley, 880.
8. Stallings, W. (2020). Wireless communications and networks (2nd ed.). Pearson Education.
9. Russell, S., & Norvig, P. (2010). Artificial intelligence: A modern approach (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Стаття надійшла до редакції 18.11.25, надійшла після рецензування 16.01.26, прийнята 24.02.26

The article was received 18.11.25, received after revision 16.01.26, accepted 24.02.26

Трофимчук Олександр Миколайович

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

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

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

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

Дзюба Володимир Андрійович

доктор філософії, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9576-814X> **e-mail:** navvon@ukr.net

УДК 004.9:[031]

Oleksandr Nesterenko, Doctor of Sciences in Engineering, Professor, Head of the Department of Information Technologies

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5329-889X>

e-mail: oleksandr_nesterenko@ieu.edu.ua

Petro Yatsuk, Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor of the Department of Information Technologies

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-7124-4849>

e-mail: petro_yatsuk@ieu.edu.ua

International European University, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AS A TECHNOLOGICAL INNOVATION STRATEGY

Abstract. *The purpose of the study is to identify information technology and methodological ways to solve current problems of ensuring an increase in development level of Geographic Information Systems (GIS) in Ukraine. A review of publications of the world scientific community was conducted based on a search in international and domestic scientometric databases, such as Scopus, Web of Science, and the resources of the Vernadsky National Library of Ukraine. A survey of the main stages of GIS development during the independence of Ukraine was carried out. These reviews address the following research questions: a) what time trends do research statistics demonstrate; b) what areas of GIS development and use are covered in the research; c) what governance strategies are reflected in the publications to overcome technological challenges in GIS development. The main results show that foreign researchers pay attention to the GIS development in various thematic categories, in particular, such as computer science and information technology. At the same time, domestic researchers pay more attention to providing general issue of GIS implementation, industry issue, and studying foreign experience. This indicates the existing gap between the practical achievements of GIS implementation in the country and the contribution of domestic scientists and specialists to the technological aspects of this area. In particular, this concerns the formation of information systems for processing spatial data, the analytical component and decision-making support tools. Nevertheless, the results of the review demonstrate that geographic information systems are becoming a key element of the national information infrastructure, which ensures effective management of territories, natural resources, defense and security. The conducted systematic review may be useful for responsible persons, as well as directly for scientists and specialists from various fields involved in the processes of formation and modernization of information technologies, systems and resources, in particular aimed at processing geospatial data.*

Keywords: *digital transformation, information technologies, decision making, spatial data infrastructure, spatial analysis.*

О.В. Нестеренко, П.П. Яцук

Міжнародний європейський університет, Київ, Україна

РОЗВИТОК ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЯК ТЕХНОЛОГІЧНА ІННОВАЦІЙНА СТРАТЕГІЯ

***Анотація.** Метою дослідження є визначення інформаційно-технологічних та методологічних шляхів вирішення актуальних проблем забезпечення підвищення рівня розвитку геоінформаційних систем в Україні. Проведено огляд публікацій світової наукової спільноти на основі пошуку у міжнародних та вітчизняних наукометричних базах даних, таких як ресурси Scopus, Web of Science та Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського, а також здійснено обстеження основних етапів розвитку геоінформаційних систем за часи незалежності. Ці огляди мають на увазі такі дослідницькі питання: а) які часові тренди демонструє статистика досліджень; б) які сфери створення та використання геоінформаційних систем розглядаються у дослідженнях; в) які державні стратегії відображені в публікаціях для подолання технологічних проблем розвитку геоінформаційних систем. Основні результати свідчать, що закордонні дослідники приділяють увагу питанням розвитку геоінформаційних систем в різних тематичних категоріях, зокрема таких як комп'ютерні науки і інформаційні технології. В той же час вітчизняні дослідники приділяють більше уваги загальним питанням впровадження ГІС, галузевим питанням та вивченню зарубіжного досвіду. Це свідчить про існуючий розрив між практичними досягненнями впровадження ГІС в країні та даниною вітчизняних науковців і фахівців технологічним аспектам цієї сфери, зокрема формуванню інформаційних систем обробки просторових даних, аналітичної складової та засобам підтримки прийняття рішень. Тим не менш результати огляду демонструють, що геоінформаційні системи перетворюються на ключовий елемент національної інформаційної інфраструктури, який забезпечує ефективне управління територіями, природними ресурсами, обороною та безпекою. Проведений систематизований огляд може бути корисним для відповідальних осіб, а також безпосередньо науковцям і фахівцям різних галузей, залучених до процесів формування та модернізації інформаційних технологій, систем та ресурсів, зокрема спрямованих на обробку геопросторових даних.*

***Ключові слова:** цифрова трансформація, інформаційні технології, прийняття рішень, інфраструктура просторових даних, просторовий аналіз.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.141-160>

Вступ

Сучасне суспільство дедалі більше залежить від просторових даних, що відображають різноманітні аспекти навколишнього середовища, інфраструктури та соціально-економічних процесів. Геоінформаційні системи (ГІС) – це наукова й технологічна основа для збирання, зберігання, аналізу, моделювання та візуалізації просторово координованої інформації. Вони є ключовим інструментом підтримки прийняття рішень у таких галузях, як природокористування, урбаністика, транспорт, екологічний моніторинг, оборона, управління ризиками та надзвичайними ситуаціями.

Історія розвитку ГІС у світі налічує вже понад 60 років – від перших експериментальних систем оброблення картографічних даних у 1960-х роках до сучасних інтелектуальних платформ із інтегрованими засобами штучного інтелекту, хмарних обчислень і великих даних (Big Data). Цей еволюційний шлях охоплює перехід від аналогових технологій до цифрових, від локальних систем до глобальних геопросторових інфраструктур, що забезпечують інтеграцію даних у масштабах усього світу.

В Україні розвиток геоінформаційних технологій розпочався близько 30 років тому, у 1990-х роках, коли почали формуватися перші наукові школи, освітні програми та прикладні системи для потреб управління територіями, екологічного моніторингу, кадастрових і топографічних робіт. Сьогодні українська ГІС-галузь активно інтегрується у світовий простір, розвиваючи національні геоінформаційні ресурси, сервіси відкритих даних і системи просторової аналітики.

Сучасний перехід від кількості накопичених людством інформаційних ресурсів до якості вирішення завдань, що стоять перед країнами, який отримав назву «цифровізація» та який пов'язаний зі зростанням ролі вивчення даних, бізнес-аналітики та застосуванням засобів штучного інтелекту, створив умови для інтелектуалізації управління та підтримки прийняття рішень. Таке широкомасштабне використання нових технологій у всіх сферах діяльності не може не приводити до постійного підвищення ефективності задоволення інформаційних потреб суспільства та забезпечення його функціонування на нових щаблях у розвитку.

В межах загальної проблеми зростання застосування ГІС в різних галузях актуальною постає задача проведення досліджень, що мають відображати суспільно-технологічні часові тренди у вказаному напрямку. На їх основі стає можливим не лише створювати умови для забезпечення ефективного розвитку економіки, а й для вибору та застосування новітніх технологічних засобів його підтримки.

Постановка задачі

Мета дослідження – визначення інформаційно-технологічних та методологічних шляхів розвитку та становлення геоінформаційних систем у світі та в Україні та підвищення рівня їх використання з урахуванням сучасних тенденцій і технологічних напрямів як міждисциплінарної науково-технологічної платформи.

Цільова спрямованість обумовлює логіку дослідження, яка направлена на постановку та вирішення наступних завдань:

- а) провести систематизований огляд публікацій світової наукової спільноти та вітчизняної наукової літератури за категорією «геоінформаційні системи»;
- б) визначити основні інтереси науковців щодо забезпечення розвитку ГІС;
- в) сформулювати оцінку факторів впливу на впровадження ГІС;
- г) здійснити оцінювання сучасного стану розвитку ГІС в країні та світі і напрямів розвитку в цій сфері;
- д) запропонувати рекомендації з удосконалення процесів розвитку ГІС на основі цифровізації та інтелектуалізації.

Аналіз досліджень і публікацій

Розвиток геоінформаційних систем у світі має понад шістдесятирічну історію, під час якої еволюція ГІС відбувалася в тісному зв'язку з розвитком комп'ютерних технологій, цифрової картографії, дистанційного зондування Землі та засобів телекомунікації. Перші концепції автоматизованої обробки просторових даних сформувалися у 60–90-х роках минулого століття під час виконання кількох проєктів у Канаді, США та Великій Британії. Однією з перших практичних реалізацій вважається Canadian Geographic Information System (CGIS), створена у 1963–1967 рр. для потреб земельного кадастру Канади. CGIS стала прототипом сучасних геоінформаційних систем: вона забезпечувала введення, збереження, аналіз і візуалізацію просторових шарів картографічних даних.

Вже в перших публікаціях, що почали з'являтися у світовому дискурсі у той час, були запропоновані визначення ГІС та їх основні теоретичні основи [1, 2]. У подальшому з розвитком технології дослідження почали охоплювати усе більш широкий діапазон тем – від використання ГІС в бібліотеках і бібліометрії до створення віртуального морського середовища та «цифрового океану» [3–5]. Сучасні дослідження розглядають ГІС для покращення надання послуг, прийняття рішень та практики управління, а також забезпечення сталого розвитку через управління даними, цифрову трансформацію та використання штучного інтелекту.

Поступове збільшення кількості публікацій призвело до появи низки оглядових робіт (systematic review), яких з часом ставало усе більше. Мета цих досліджень полягає у визначенні основних напрямків та тенденцій, а також узагальненні набутого досвіду створення і використання ГІС. Їх спрямованість демонструє широту видів діяльності і технологій, як, наприклад, архітектура програмного забезпечення для розробки ГІС і корпоративних систем з огляду на важливість парадигми компонентної орієнтації [6], вплив на ГІС великих даних (Big Spatial Data) [7], картографування локальних кліматичних зон в умовах забудови довкілля [8], вимірювання вразливості до повеней [9], аналіз небезпеки зсувів, спричинених опадками, на основі даних дистанційного зондування [10], визначення критеріїв, що впливають на потенціал підземних вод [11], використання дистанційного зондування та ГІС щодо впливу військових дій на навколишнє середовище [12], виробництво, організація та надання послуг з догляду за літніми людьми [13], управління сталим туризмом [14], ГІС-картографування в багатокритеріальному аналізі рішень для визначення місця розташування та проєктування проєктів відновлюваної енергетики [15] та чимало іншого.

Стосовно української частини історії ГІС можна казати про 30-річний період, адже починається вона з 90-х років з розвитку геоінформатики та експансії на наш ринок відповідного закордонного програмного забезпечення, у тому числі й того, що вільно розповсюджується. Суттєвий внесок у поширення застосування ГІС на нашій території пов'язаний з розповсюдженням потужного програмного забезпечення від відомої компанії ESRI.

Процеси поширювання ГІС знайшли відображення й в дослідженнях вітчизняних вчених. Одним з перших досліджень, що зафіксовано в електронних фондах Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського,

є науковий збірник «Агрохімія і ґрунтознавство» 1998 року, де запропоновано використання геоінформаційних систем для ведення моніторингу земельних ресурсів. 2000 року вийшла робота [16], в якій наведено огляд програмних засобів компанії ESRI для реалізації корпоративних систем управління з використанням геоінформаційних технологій.

Більш активне поширення публікацій почалось лише з початку 2000-х. Однак, на відміну від закордонних джерел, у корпусі вітчизняних публікацій практично відсутні оглядові роботи – може, з-за відносно короткої історії поширення ГІС в країні. Однак треба звернути увагу на наявність наукових монографій, як наприклад [17], де розглянуто використання геоінформаційних технологій для проведення діахронно-генетичного аналізу територій Харкова, а також публікацій зі стратегічних напрямів. Серед них можна відмітити роботу [18], в якій описано історію, міжнародний досвід та сучасний стан інтелектуальних геоінформаційних систем, дослідження [19], в якому узагальнено світовий досвід та тенденції розвитку інфраструктури геопросторових даних (ІГД) у розвинених країнах, оцінено стан формування національної ІГД в Україні, а також проведено ідентифікацію ключових проблем і завдань забезпечення її сталого розвитку та функціонування, роботу [20], де представлено геоінформатику як інструмент для підтримки прийняття рішень щодо планування міського та регіонального розвитку, землекористування, інфраструктури, ресурсів, управління навколишнім середовищем і просторового аналізу, а також деякі інші роботи.

Таким чином, науково-методичні засади подальшого розвитку геоінформаційних систем потребують подальших досліджень в контексті пріоритетів сучасних технологічних трендів та соціальних, економічних та екологічних проблем. Концептуальний базис дослідження цих питань прогресує, а особливості технологічного середовища постійно розвиваються. Тому актуальність завдання полягає у врахуванні цих процесів у методологічних принципах проектування та розробки ефективних геоінформаційних систем та відповідних електронних ресурсів для забезпечення їх широкого застосування в усіх сферах суспільної діяльності.

Результати дослідження

За шістдесятирічну історію розвитку геоінформаційних систем в багатьох публікаціях в різних країнах світу запропоновані низки наборів принципів розвитку ГІС та наведена різнопланова панорама тем, що охоплюють напрямки і технології їх розробки та вдосконалення. Упродовж цього періоду вказана сфера істотно змінилася і як досить потужна інженерна дисципліна та науковий напрямок стрімко розвивається.

У цьому зв'язку корисні знання для теорії і практики ГІС можуть надати систематизовані огляди публікацій світової наукової спільноти, що реєструються у міжнародних наукометричних базах даних, таких, наприклад, як ресурси Scopus та Web of Science, а також вітчизняних джерел, зокрема з Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського (НБУВ). Подивимось, які здобутки містять вказані ресурси.

З застосуванням пошукової системи Elsevier у Web of Science Core Collection (WoS) за запитом "Geographic Information System" отримано 59143 результатів. Статистика цих публікацій за роками видань за період

з 1990 по 2024 роки показана на рис. 1. Розподіл публікацій по основних категоріях видань (галузях знань), наведений у табл. 1, свідчить, що основна кількість публікацій присвячена, окрім традиційних наук про природне середовище, екологію та географію, технологічним напрямкам – комп’ютерні науки, інжиніринг та інші науково-технологічні теми.

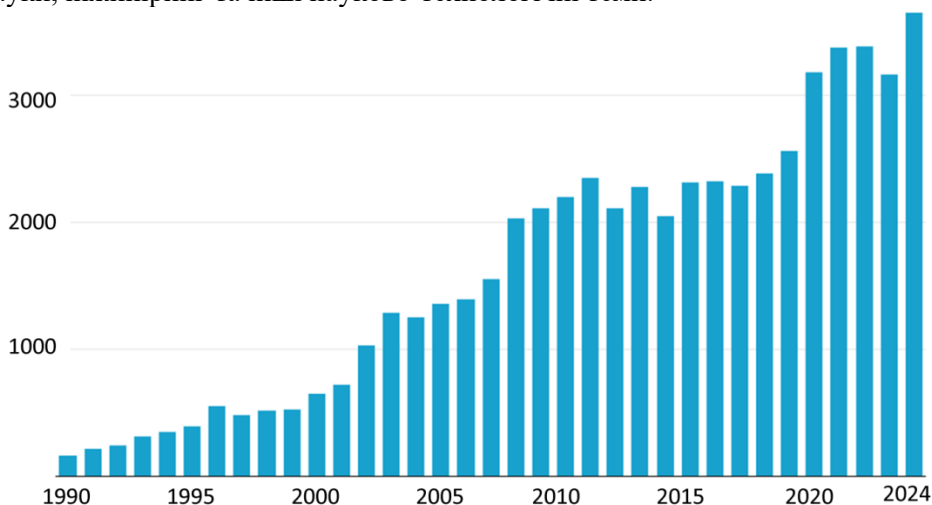


Рис. 1. Статистика результатів пошуку в Web of Science Core Collection за запитом "Geographic Information System"

Таблиця 1. Статистика публікацій у Web of Science Core Collection по основних категоріях знань

№ з/п	Категорія видань	Кількість публікацій	Відсоток з найденого
1	Environmental Sciences Ecology	21,291	37,50
2	Computer Science	20,661	36,39
3	Engineering	19,649	34,61
4	Geography	12,789	22,53
5	Science Technology Other Topics	9,683	17,06
6	Biodiversity Conservation	8,359	14,72
7	Agriculture	7,347	12,94
8	Mathematics	7,272	12,81
9	Geology	7,067	12,45
10	Water Resources	6,391	11,26

Відповідні результати пошуку по країнах, які демонструють найвищі показники за кількістю публікацій, наведено на рис. 2. Для порівняння у цей перелік також додано й Україну.

З застосуванням пошукової системи Scopus за запитом "Geographic Information System" отримано 106720 результатів (по 2024 рік). Статистика публікацій за роками видань за період з 1990 по 2024 роки показана на рис. 3. Розподіл знайдених за цей період публікацій за галузями знань, показаний у табл. 2, свідчить про схожість з результатами, отриманими в WoS.

Відповідні результати пошуку по країнах публікацій показані на рис. 4.

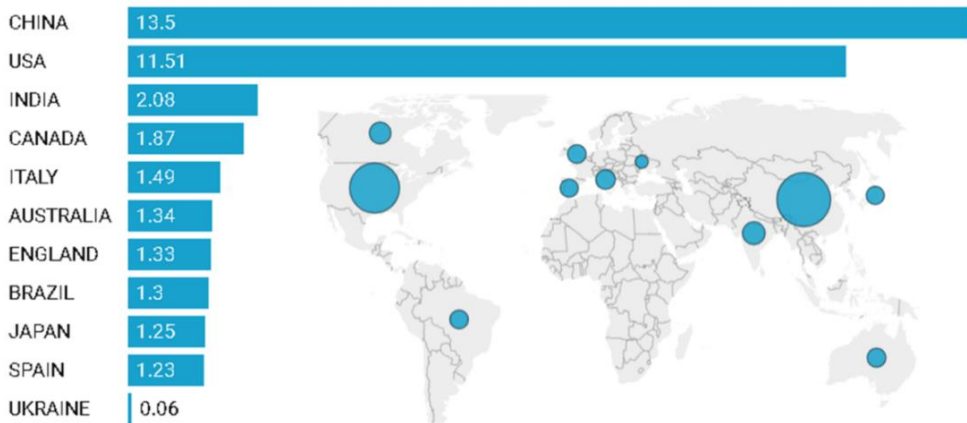


Рис. 2. Топ країн за кількістю публікацій за результатом пошуку в Web of Science Core Collection за запитом "Geographic Information System"

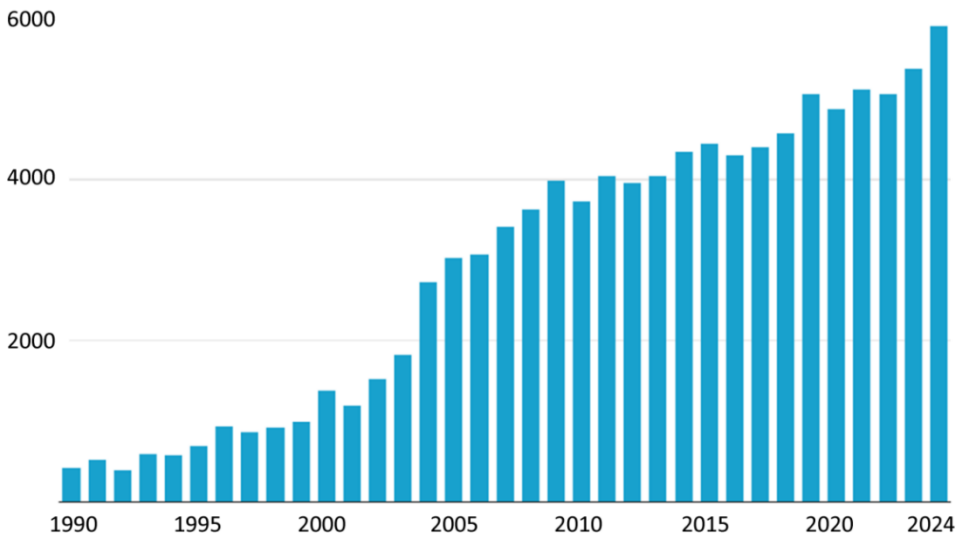


Рис. 3. Статистика результатів пошуку в Scopus за період з 1990 по 2024 роки за запитом "Geographic Information System"

Наведені результати свідчать про велику зацікавленість світової наукової спільноти до сфери застосування геоінформаційних технологій. Період зростання кількості публікацій у 2005–2010 роки, який можна спостерігати на діаграмах рис. 1 та 3, збігається з етапами розвитку компаній ESRI, Intergraph, MapInfo, Autodesk та захоплення ринку їх програмними продуктами, а також бурхливого розвитку Інтернет-технологій і поширенням WebGIS, коли користувачі отримали доступ до просторових даних через веб-браузери та з'явилися інтерактивні карти (Google Maps, Bing Maps, Yahoo! Maps) [21, 22].

Таблиця 2. Статистика публікацій у Scopus по основних категоріях знань

Категорія видань	Кількість публікацій	Відсоток з найденого
Environmental Science	30141	15,4
Computer Science	28039	14,3
Engineering	26061	13,3
Earth and Planetary Sciences	25153	12,9
Social Sciences	19173	9,8
Agricultural and Biological Sciences	11831	6,1
Medicine	9833	5,0
Mathematics	9600	4,9
Energy	5978	3,1
Physics and Astronomy	5856	3,0

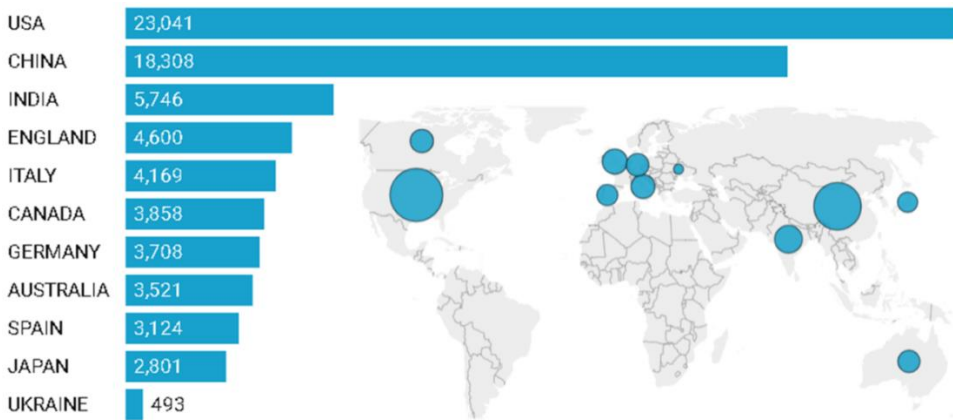


Рис. 4. Топ-10 країн за кількістю публікацій за результатом пошуку в Scopus за запитом "Geographic Information System"

Це сприяло демократизації ГІС – просторові сервіси стали доступними широким колам користувачів. Подальша публіцистична активність пояснюється розвитком супутникових даних, GPS, мобільних технологій, а також початком інтеграції ГІС із системами управління базами даних, ERP-системами та інструментами бізнес-аналітики (BI), що розширило сферу застосування ГІС у транспортній логістиці, енергетиці, безпеці, аграрному секторі. Саме у цей період міжнародна організація Open Geospatial Consortium (OGC) розробила відкриті стандарти обміну геоданими – WMS, WFS, GML, які забезпечили інтеоперабельність між різними системами та платформами. Все це стало запорукою переходу від інновацій і наукового інтересу до повсякденного використання ГІС в різних сферах діяльності [23, 24].

Зростання кількості публікацій продовжується й в наші часи. На сучасному етапі геоінформаційні системи еволюціонують у бік інтелектуальних просторових платформ, що поєднують штучний інтелект (AI), машинне навчання (ML), великі дані (Big Data), хмарні обчислення та Інтернет речей (IoT) [25–27]. Сучасні рішення (Google Earth Engine, Esri ArcGIS Online та ін.) забезпечують оброблення масивів супутникових зображень у режимі

реального часу, а концепція «цифрових двійників» територій (Digital Twin) відкриває нові можливості для моделювання урбаністичних процесів, планування інфраструктури та управління екосистемами [28, 29].

Таким чином, сучасні ГІС виступають не лише як технологічні звершення, а як комплексні аналітичні екосистеми, що інтегрують геодані, алгоритми, сервіси, сенсори та користувачів у єдиному геопросторовому середовищі.

Подивимось, як ці процеси знаходять відображення у вітчизняному дискурсі на прикладі наукових публікацій, які можна знайти завдяки можливостям пошукових сервісів НБУВ. Пошуковий запит по ключовому слову "геоінформ" в базі даних "Наукова періодика України" НБУВ по 2024 р. надав 722 результатів (рис. 5). За цими даними надходження зафіксовані лише з 2003 року. У той же час в реферативній базі даних "Україніка наукова" знайдено 2009 результатів, починаючи з 1998 року. Необхідно відмітити, що Наукова періодика України – це електронні версії періодичних наукових фахових видань наукових установ та навчальних закладів. Є найбільшим за охопленням повнотекстовим ресурсом в Україні. У БД «Україніка наукова» представлено наукові публікації з усіх галузей знань. Основні типи представлених документів – монографії, автореферати дисертацій, статті з наукової фахової періодики.

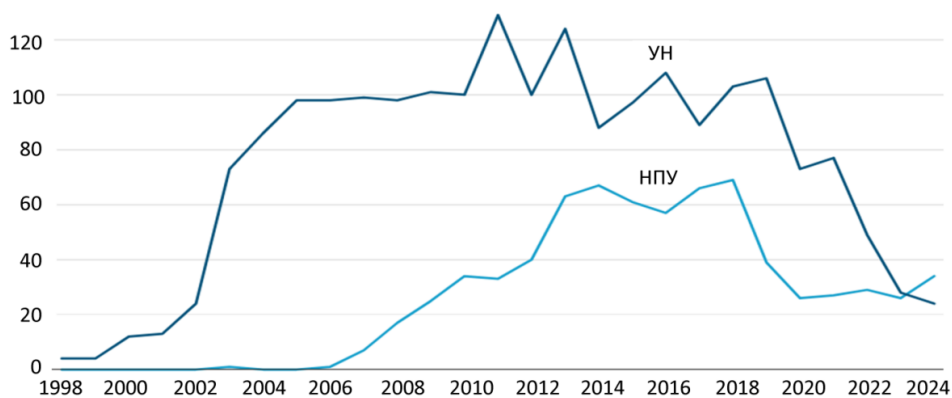


Рис. 5. Статистика результатів пошуку в базах даних "Наукова періодика України" (НПУ) та "Україніка наукова" (УН) НБУВ за запитом "геоінформ"

Якщо розглянути галузеву тематику вітчизняних публікацій, що зібрані в БД "Наукова періодика України" (табл. 3), необхідно відмітити, що в цьому корпусі переважають питання екології та природокористування, управління територіями та тематика оборони і військової справи. В той же час інформаційним технологіям приділяється не відчутна увага. При цьому доцільно звернути увагу на те, що в роботах, відображених у Web of Science Core Collection та Scopus, перевага віддається в першу чергу саме технологіям.

Якщо провести детальний аналіз вітчизняних публікацій, можна визначити основні етапи, які пройшло становлення геоінформаційних систем в нашій країні за понад тридцятирічну історію. Передусім необхідно зазначити, що розвиток ГІС в Україні віддзеркалює загальносвітові тенденції становлення цифрових технологій управління просторовими даними. Українська

ГІС-галузь формувалася на перетині картографічної науки, інформатики, геодезії, екології, землеустрою та управління територіями. Еволюцію ГІС в Україні умовно можна поділити на два основні етапи – становлення у 1990–2000-х роках та інституціоналізацію та розвиток національних геоінформаційних ресурсів у 2010-х, що відповідає графікам на рис. 5. На жаль, сучасна цифрова трансформація 2020-х років не знайшла належного відображення з-за обмежень військового стану цього періоду.

Таблиця 3. Тематика публікацій за запитом "геоінформ" в базі даних "Наукова періодика України" НБУВ

№ з/п	Галузь знань	Кількість публікацій за роками (у % до річного обсягу публікацій)							
		2024	2023	2022	2021	2020	2019	2018	Середнє за 7 років
1.	Екологія та природокористування	29,4	27,3	31,0	11,1	26,9	20,5	8,7	22,26
2.	Управління територіями	23,5	18,2	13,8	7,4	0,0	5,1	27,5	13,76
3.	Оборона та військова справа	5,9	9,1	27,6	18,5	11,5	12,8	5,8	13,06
4.	Транспортна інфраструктура	8,8	4,5	0,0	14,8	7,7	5,1	11,6	7,55
5.	Інформаційні технології	2,9	9,1	3,4	7,4	11,5	12,8	4,3	7,38
6.	Землеустрій	5,9	9,1	0,0	7,4	7,7	2,6	1,4	4,89
7.	Цивільний захист	0,0	0,0	6,9	3,7	7,7	7,7	2,9	4,13
8.	Дистанційне зондування	0,0	0,0	3,4	7,4	7,7	2,6	5,8	3,84
9.	Геологія	2,9	4,5	0,0	3,7	3,8	2,6	5,8	3,36
10.	Сільське господарство та агродіяльність	0,0	13,6	0,0	0,0	0,0	2,6	7,2	3,35
11.	Картографія	8,8	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	2,36
12.	Географічні дослідження	2,9	0,0	3,4	3,7	0,0	2,6	1,4	2,03
13.	Геодезія	5,9	0,0	3,4	0,0	0,0	2,6	1,4	1,93
14.	Інше	2,9	0,0	6,9	14,8	11,5	17,9	13,0	9,98

У 1990-х роках, коли Україна переходила до нової політичної та економічної системи, розпочався період привернення уваги до питань розвитку засобів інформатизації. На початку та в середині 1990-х років використання комп'ютерів ще було нечисленним. З-за цього через відсутність доступу до інформаційних технологій та Інтернету можливості впровадження геоінформаційних сервісів були суттєво обмежені. У зв'язку з такими технологічними та організаційними проблемами процес впровадження навіть елементів ГІС був малопомітним. Однак вже у той час було докладено зусиль для переходу від аналогової картографії до цифрової та, з появою перших вітчизняних програмно-апаратних рішень, для оброблення просторових даних [30]. У той час у провідних наукових і навчальних центрах сформувалися перші наукові школи з геоінформатики. У цей період ГІС почали впроваджуватися у практику земельно-кадастрових, екологічних, геологічних і топографо-геодезичних робіт. Проводились дослідження з моделювання екосистем, моніторингу забруднення довкілля, аналізу землекористування.

Розпочалися дослідження й з напрямку використання ГІС у державному управлінні [31, 32]. Значний внесок у популяризацію ГІС зробили державні установи, зокрема Головне управління геодезії, картографії та кадастру, а також наукові інститути НАН України [16, 33].

Перші ГІС-рішення розроблялися переважно на основі закордонних платформ (ArcInfo, MapInfo, ERDAS), однак поступово з'явилися й українські розробки – для еколого-географічного аналізу, містобудівного планування та управління земельними ресурсами. Тим не менш впровадження ГІС все ще було мізерним і носило переважно інформаційний характер.

Початок 2000-х років став етапом інституціоналізації геоінформаційних технологій в Україні. З'являються державні програми створення геоінформаційних систем, продовжується напрацювання пропозицій щодо використання ГІС для підтримки електронного урядування, формуються галузеві бази просторових даних, розвиваються стандарти геоданих і методи дистанційного дослідження Землі та картографічної візуалізації [34–37]. Ключовим проектом цього періоду стало формування Державного земельного кадастру, що заклало основу для створення національної інфраструктури просторових даних [38]. Паралельно впроваджувалися регіональні ГІС для містобудівного управління (ГІС Києва, Львова, Харкова), моніторингу довкілля, транспортної логістики [39]. У ті часи фактично заблищала зоря настання «геоінформаційного суспільства» [40].

У 2010-х роках продовжувався підйом інтересу до геоінформаційних систем. Україна приєдналася до європейських ініціатив у сфері геопросторових даних, зокрема INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe), що сприяло адаптації європейських стандартів до національної нормативної бази. Створювалися відкриті геоінформаційні ресурси, зокрема Публічна кадастрова карта України, геопортали Держгеокадастру, системи моніторингу довкілля та надрокористування [41–43].

У цей період ГІС почали активно використовуватися й в освіті: було відкрито навчальні програми з геоінформатики, дистанційного зондування Землі, просторового аналізу та екологічного моніторингу [44, 45].

Зазначені вище події створили основу для забезпечення нових викликів. У 2020-х роках розвиток ГІС в Україні відбувається в умовах цифрової трансформації, відкриття публічних даних і впровадження інтелектуальних технологій аналізу простору [20]. Значну роль відіграють національні та регіональні геопортали (Geoport.gov.ua, Екомапа, Мапа відновлення України), а також галузеві системи управління природними ресурсами та інфраструктурою [46].

Важливим напрямом стала інтеграція геоінформаційних систем із системами аналітики та прогнозного моделювання, що застосовуються у військовій, гуманітарній, екологічній і транспортній сферах. Після 2022 року ГІС отримали новий стратегічний вимір – як інструмент моніторингу воєнних дій, оцінювання пошкоджень територій, відновлення інфраструктури та планування безпечного використання земель [47–51].

Україна також бере участь у міжнародних проектах обміну геопросторовими даними (Copernicus, GEO, UN-GGIM:Europe), що сприяє інтеграції в європейський інформаційний простір [19]. Активно розвиваються стартапи у сфері геоаналітики, супутникового моніторингу, хмарних сервісів, агро-ГІС і смарт-урбанізму [52, 53]. Сучасний український ГІС-сектор сфери

ІТ поступово трансформується з набору окремих систем у цілісну національну геоінформаційну інфраструктуру, що базується на відкритих даних, стандартах OGC та міжнародній кооперації.

Як оцінити рівень розвитку цього середовища у порівнянні з передовими країнами світу? На жаль, серед численних міжнародних індексів розвитку інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) немає окремого рейтингування за категорією ГІС. Однак, враховуючи, що ГІС є важливою складовою сфери ІКТ і також здійснює свій вплив на всі сфери соціально-економічної діяльності, опосередковано можна спиратися на дослідження розвитку ІКТ-сфери в Україні за міжнародними рейтингами та визначати перспективи розвитку. Серед сучасних індексів доцільно розглянути динаміку значень для України за Світовим рейтингом цифрової конкурентоспроможності IMD (IMD World Digital Competitiveness Ranking – WDCR), який аналізує та ранжує рівень впровадження цифрових технологій, що веде до трансформації урядової та бізнес діяльності і суспільства загалом, та Глобальним індексом інновацій (Global Innovation Index – GII), що найбільш повно оцінює рівень інноваційного розвитку та ефективність інноваційної екосистеми в економіках країн світу. Серед показників, які характеризують інноваційний розвиток, до складу GII входять показники, що оцінюють й результати розвитку сектору ІКТ.

Зважаючи на те, що зі зрозумілих причин достовірність даних, зібраних для України, була обмеженою, за рейтингом WDCR наша країна не була включена до звітів 2022 – 2024 років. У дослідженні ж за 2021 р.¹ Україна знаходилась на 54-му місці з 63 країн світу. Такий низький рівень пов'язаний з невисокими позиціями по окремих показниках цього рейтингу, зокрема за показниками «Цифрові технології» і «Цифрова готовність» (обидва 58-ме місце).

За GII Україна станом на 2024 рік має 60-те місце² з 133 країн (опустилася на 11 позицій у порівнянні з 2021 роком) і посідає 4-те місце серед групи країн з рівнем доходу нижче середнього. На її позицію найбільше впливає падіння показників, пов'язаних з її інституціями (107-ме місце) та людським капіталом і дослідженнями (54-те місце). Приплив прямих іноземних інвестицій, що показує 88-ме місце, також значно скоротився. За окремими показниками розвитку ІКТ значення відчутно вищі, але й тут є такі, що тягнуть донизу, зокрема такі як «Використання ІКТ», «Імпорт послуг ІКТ» та деякі інші.

З цих даних випливає, що не все ще зроблене в країні належним чином для розвитку ІКТ-сфери. Ще 1998 року було прийнято Закон України “Про Національну програму інформатизації”, але впродовж кількох років фінансування цієї програми було суттєво скорочене і вона практично перестала функціонувати. Таким чином, створення необхідної організаційної і правової бази інформаційної галузі та поступу у технологічному розвитку все ще потребує вдосконалення, зокрема зусиллями громадськості, бізнесу й держави. Важливим кроком у цьому напрямку стало прийняття 2022 року нового закону про Національну програму інформатизації, серед основних завдань якої значиться розробка, впровадження та застосування ІКТ у різних

¹ <https://www.imd.org/wcc/world-competitiveness-center-rankings/world-digital-competitiveness-rankings-2021/>

² <https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/en/gii-2024-results.html>

сферах діяльності. Враховуючи, що згідно з новим законом Генеральний замовник Національної програми інформатизації щороку має подавати звіт про стан інформатизації та хід виконання завдань, програм, проєктів, робіт з інформатизації, невдовзі можна буде періодично спостерігати за подальшим просуванням і відчутний прогрес України у цій сфері.

Одночасно необхідно зазначити, що розвиток ІКТ – це один із важливих напрямків співпраці між Україною і Європейським Союзом. Отже, мета, що Україна досягне європейського рівня розвитку в цій сфері, залишається реальною. Крім того, необхідно зазначити, що актуальність цього питання ще суттєвіше зросла під час повномасштабного вторгнення агресора на територію країни. Потреба адаптуватися до нових реалій воєнного часу, що вимагає концентрації та швидких дій, торкнулася і процесів цифровізації, які на довоєнний час активно відбувалися в Україні. В такій складній ситуації інформаційні технології, безумовно, відіграють важливу роль у забезпеченні обороноздатності, ефективності державного управління та підтримці населення. Прикладом може бути мобільний застосунок "Дія", який, пропонуючи все більше послуг, що можна отримати прямо тут і зараз, без довідок, печаток і візитів до установ, вже давно став одним із основних у смартфонах українців. І природньо, що саме «Дію» з початку повномасштабного вторгнення в найкоротші терміни почали переформатовувати в універсальну платформу, яка має допомагати населенню не лише у мирний час, а й під час війни, надавати послуги, актуальні для воєнного часу.

На завершення необхідно відмітити, що запроваджені за роки незалежності зусиллями держави, бізнесу й громадськості кроки щодо розвитку ІКТ, попри всю їхню важливість, тривалий час все ж залишались фрагментарними і не забезпечували створення необхідної організаційної та технічної бази. Зокрема, це відбувалось із-за неповноти, неефективності й суперечливості чинної нормативно-правової бази інформаційної галузі. Недостатньою складалась й публікаційна увага з боку науковців та фахівців до поточних проблем розвитку інформаційних систем і сервісів. Приміром, й досі, після 30 років, майже немає робіт, які б узагальнювали набутий досвід та провели аналіз існуючої ситуації в сфері ГІС. І тільки в останні кілька років ситуація почала змінюватись на краще.

Висновки

Аналіз процесів розвитку геоінформаційних систем в країнах світу та в Україні, проведений на основі огляду публікацій світової та вітчизняної наукової спільноти, свідчить про важливу роль технологічної складової в забезпеченні їх прискорення та ефективності. Саме завдяки використанню сучасних інформаційних технологій та засобів мобільних комунікацій Україні вдалося в останні роки після тривалого застою перейти у світових рейтингах у напрямку високих показників. Безумовно, це стало можливим і завдяки організаційно-політичній підтримці з боку керівництва держави.

Суспільний попит на високоякісні інформаційні послуги в умовах цифрової трансформації буде безперервно зростати. У зв'язку з новими викликами нарощуються й вимоги до діяльності бізнесових структур і органів влади та ефективності рішень, що приймаються. Проведений аналіз свідчить про

існуючі розриви між технологічними трендами та засобами забезпечення цих спрямувань. Чимало сучасних технологічних тенденцій в сфері ГІС відображені у вітчизняних публікаціях відносно невагомими. Основні причини цього полягають у повільності адаптації державної системи до поточних технологічних зрушень, а також в економічних труднощах запровадження й опанування сучасних інформаційних технологій. Ця контрверза породжує стримування інноваційної актуалізації сфери ІКТ, що негативно впливає й на темпи впровадження засобів ГІС. Таким чином, ключовим рішенням має бути значне підвищення рівня уваги вищого державного керівництва та науково-технічної спільноти до вказаних питань. Такий підхід може створити умови для об'єднання всіх учасників суспільних процесів в єдиній системі і, як наслідок, дозволить в подальшому посилити позиції країни в європейській і світовій спільноті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Amsterdam, R., Andresen, E., & Lipton, H. (1972). Geographic information systems in the U.S.: An overview. *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference (AFIPS 1972)*, 511–522. <https://doi.org/10.1145/1478873.1478942>
2. Weber, W. (1979). Geographic information systems (GIS): A review and reflections on the future development. *International Yearbook of Cartography*, 19, 119–138.
3. Cox, A. B., & Gifford, F. (1997). An overview to geographic information systems. *Journal of Academic Librarianship*, 23(6), 449–461. [https://doi.org/10.1016/S0099-1333\(97\)90169-5](https://doi.org/10.1016/S0099-1333(97)90169-5)
4. Wang, X. M., Ma, M. G., Li, X., & Zhang, Z. Q. (2014). Applications and researches of geographic information system technologies in bibliometrics. *Earth Science Informatics*, 7(3), 147–152. <https://doi.org/10.1007/s12145-013-0132-4>
5. Chen, G., Li, W. Q., Kong, Q. Q., et al. (2012). Recent progress of marine geographic information system in China: A review for 2006–2010. *Journal of Ocean University of China*, 11(1), 18–24. <https://doi.org/10.1007/s11802-012-1825-x>
6. Uyaguari, A., Espinosa-Gallardo, E., Jácome-Guerrero, S. P., et al. (2018). Open source web software architecture components for geographic information systems in the last 5 years: A systematic mapping study. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 721, 688–699. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7_65
7. Usmani, R. S. A., Hashem, I. A. T., Pillai, T. R., et al. (2020). Geographic information system and big spatial data: A review and challenges. *International Journal of Enterprise Information Systems*, 16(4), 101–145. <https://doi.org/10.4018/IJEIS.2020100106>
8. Quan, S. J., & Bansal, P. (2021). A systematic review of GIS-based local climate zone mapping studies. *Building and Environment*, 196, 107791. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107791>
9. Chan, S. W., Abid, S. K., Sulaiman, N., et al. (2022). A systematic review of flood vulnerability using geographic information systems. *Heliyon*, 8(3), e09075. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09075>
10. Yang, Z. L., Lu, H., Zhang, Z. J., et al. (2023). Visualization analysis of rainfall-induced landslide hazards based on remote sensing and geographic information systems: An overview. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 2374–2402. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2229797>
11. Minh, D. T. (2023). Criteria affecting groundwater potential: A systematic review of literature. In *Advances in research on water resources and environmental systems* (pp. 85–110). https://doi.org/10.1007/978-3-031-17808-5_7
12. Alvarez, R. D. D., Apan, A., & Maraseni, T. (2024). The perspectives of remote sensing and GIS on military environmental impacts: A systematic review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(1), 113. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13514-0>

13. Wang, X., & Liu, Z. (2024). Navigating aged care services with GIS: Trends, developments, and future directions. *BMC Geriatrics*, 24(1), 243. <https://doi.org/10.1186/s12877-024-04799-4>
14. Cinar, K., Kavacik, S. Z., & Erul, E. (2025). Bibliometric analysis of GIS-based tourism research: Trends, topics, and future directions in terms of sustainable tourism management. *SAGE Open*, 15(2), 21582440251335733. <https://doi.org/10.1177/21582440251335733>
15. Cook, D., & Petursson, J. G. (2025). The role of GIS mapping in multi-criteria decision analysis in informing the location and design of renewable energy projects: A systematic review. *Energy Strategy Reviews*, 59, 101765. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101765>
16. Литвинов, В. В., Шиндер, В. С., Кожевников, В. А., та ін. (2000). Архітектура програмних систем автоматизації бізнес-процесів підприємства з використанням ГІС та Інтернет технологій. *Мат. машини и системы*, 1, 81–93.
17. Шипулін, В. Д., Патракеєв, І. М., Толстохатько, В. А., та ін. (2014). *Інформаційно-комунікаційні технології у формуванні міського середовища* (В. Т. Семенов, ред.). Харків: Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова.
18. Кісь, Я. П. (2008). Інтелектуальні геоінформаційні системи. Міжнародний досвід та шляхи розвитку в Україні. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 621, 139–143.
19. Карпінський, Ю., Лященко, А., Макаренко, Д., & Черін, А. (2021). Національна інфраструктура геопросторових даних України у світовому вимірі: стан та нагальні завдання розвитку і сталого функціонування. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 1, 104–112.
20. Копійка, О. В. (2024). Геоінформатика в системах підтримки прийняття рішень. *Наукові записки Малої академії наук України*, 2, 37–47.
21. Luo, Y., Wang, X., Xiong, G., & Xu, Z. (2005). Design hierarchical component-based WebGIS. *Lecture Notes in Computer Science*, 3516, 515–522. https://doi.org/10.1007/11428862_71
22. Fangli, N., Kang, W., & Juan, W. (2010). Designing and realization of campus WebGIS based on ArcGIS server. In *Proceedings of the 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering* (Vol. 5, pp. 72–75).
23. Ye, K., & Guo, Y. (2012). The design and research of the next generation of ERP based on GPS and GIS. *Advanced Materials Research*, 403–408, 1736–1739. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.403-408.1736>
24. Manick, N., Appigadoo, A., & Cadarsaib, Z. (2019). ERP and GIS relevance for fire rescue services. In *Proceedings of the 2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence* (pp. 922–929). <https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701261>
25. Soliman, A., & Terstriep, J. (2020). Leveraging geospatial data gateways to support the operational application of deep learning models: Vision paper. In *Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems* (pp. 593–596). <https://doi.org/10.1145/3397536.3422232>
26. Khan, R. A., Bibi, M., Khokhar, M., & Tufail, M. M. B. (2024). Geographic information system and AI integration to support sustainable environment: A glance from the construction sector. In *Harnessing AI in Geospatial Technology for Environmental Monitoring and Management* (pp. 145–175). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8104-5.ch007>
27. Martinez, J. V. Y., Skarmeta, A. F., Zamora-Izquierdo, M. A., & Ramallo-Gonzalez, A. P. (2020). IoT-based data management for smart agriculture. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded and Distributed Systems* (pp. 41–46). <https://doi.org/10.1109/EDiS49545.2020.9296443>
28. Gao, Y., Xiong, G., Hu, Z., et al. (2024). Bridge digital twin for practical bridge operation and maintenance by integrating GIS and BIM. *Buildings*, 14(12), 3731. <https://doi.org/10.3390/buildings14123731>

29. Tan, F., & Cheng, Y. (2024). A digital twin framework for innovating rural ecological landscape control. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00888-8>
30. Руденко, Л. Г. (2001). Географічна картографія в Україні та її значення у геоінформаційному просторі. *Український географічний журнал*, 3, 110–113.
31. Нестеренко, О. В. (2000). Використання ГІС-технологій при організації даних в органах державної влади. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 2(1), 60–66.
32. Нестеренко, О. В. (2000). Геоінформаційні технології та інтеграція інформаційно-аналітичних систем органів державної влади України. *Вісник геодезії та картографії*, 2(17), 33–37.
33. Заблоцький, В. Г., & Шкіль, В. О. (2000). Оцінка стану національної безпеки України з використанням геоінформаційних технологій. *НТИ*, 3, 3–8.
34. Карпінський, Ю. О., & Лященко, А. А. (2002). Шляхи становлення національної інфраструктури просторових даних та інтеграції України в світовий геоінформаційний простір. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 15(54), 1, 3–11.
35. Карпінський, Ю. О., & Лященко, А. А. (2004). Шляхи розвитку стандартизації та сертифікації географічної інформації / геоматики в Україні. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 17(56), 2, 105–110.
36. Лялько, В. І., Попов, М. О., Зубко, В. П., & Рябоконеко, О. Д. (2004). Стан та перспективи розвитку дистанційних методів дослідження Землі в Україні. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 17(56), 2, 64–71.
37. Нестеренко, О. В. (2004). Використання геоінформаційних технологій для забезпечення системи електронного уряду. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 17(56), 2, 99–104.
38. Лихогруд, М. Г., Серединин, Є. С., Дядюн, В. Ю., та ін. (2002). Стандарт бази географічних даних автоматизованої системи державного земельного кадастру України (реалізація для платформи ESRI ArcGIS 8.x). *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 15(54), 1, 12–32.
39. Дишлик, О. П., & Марков, С. Ю. (2007). Підходи до створення картографічної основи атласу ринкових цін земель в населеному пункті. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 20(59), 1, 22–28.
40. Нестеренко, О. В. (2005). Геоінформаційне суспільство. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 18(57), 1, 103–110.
41. Барладін, О. В., Миколенко, Л., & Скляр, О. Ю. (2012). Геоінформаційний проект з реагування на надзвичайні ситуації з базами даних та інфраструктурою Київської області. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 25(64), 1, 7–13.
42. Ішук, О. О. (2012). ГІС в оцінці ризиків від екстремальних ситуацій, викликаних паводками і водопіллям. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 25(64), 1, 86–94.
43. Путренко, В. В. (2012). Використання хмарних сервісів для тематичного картографування. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 25(64), 1, 191–199.
44. Пересадько, В., Сауленко, О., & Байназаров, А. (2019). Історія і перспективи застосування геоінформаційних систем у навчальному процесі з географії. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, 30, 81–93.
45. Мельник, А. В. (2008). Проблеми і можливості розвитку геоінформаційної освіти в Україні. *Український географічний журнал*, 4, 48–51.
46. Тимченко, С. І. (2024). Концепція цифровізації дорожньо-інфраструктурних проектів в Україні: використання геоінформаційних технологій для підвищення ефективності управління. *Управління розвитком складних систем*, 60, 95–104.

47. Поморцева, О. Є., Кобзан, С. М., & Штерндок, Е. С. (2023). Використання геоінформаційних технологій при веденні бойових дій в сучасних умовах. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*, 1, 69–73.
48. Бялий, М. О. (2024). Оцінка інформативності геоінформаційних систем військового призначення. *Технічні науки та технології*, 3, 132–142.
49. Чабанюк, В. С., & Дишлик, О. П. (2023). До питання стратегії використання геоінформаційних систем і технологій для управління територією. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*, 3, 110–130.
50. Лебідь, О. Г., Охарєв, В. О., Федосєнков, С. Г., та ін. (2023). Геоінформаційні технології екологічного моніторингу акваторії Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС. *Екологічна безпека та природокористування*, 4, 130–144.
51. Піріков, О. В. (2022). Геоінформаційний системний підхід до аналізу впливу збройних конфліктів на екологічний стан навколишнього природного середовища. *Екологічна безпека та природокористування*, 1(41), 5–17.
52. Недоснований, О. Ю., Черняк, О. І., & Голінко, В. В. (2023). Порівняльний аналіз хмарних сервісів для обробки геоінформаційних даних. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2, 50–57.
53. Мінаєв, Д., & Раделицький, Ю. (2023). Класифікація витрат агродіяльності з позиції обліку і контролю в умовах використання геоінформаційних технологій. *Вісник економіки*, 3, 97–114.

Стаття надійшла до редакції 11.11.25, надійшла після рецензування 26.01.26, прийнята 23.02.26

REFERENCES

1. Amsterdam, R., Andresen, E., & Lipton, H. (1972). Geographic information systems in the U.S. An overview. *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference, AFIPS 1972*, 511–522. <https://doi.org/10.1145/1478873.1478942>
2. Weber, W. (1979). Geographic Information Systems (GIS) – a review and reflections on the future development. *International Yearbook of Cartography*, 19, 119–138.
3. Cox, A. B., & Gifford, F. (1997). An overview to geographic information systems. *Journal of academic librarianship*, 23, 6, 449–461. [https://doi.org/10.1016/S0099-1333\(97\)90169-5](https://doi.org/10.1016/S0099-1333(97)90169-5)
4. Wang, X. M., Ma, M. G., Li, X., & Zhang, Z. Q. (2014). Applications and researches of geographic information system technologies in bibliometrics. *Earth science informatics*, 7, 3, 147–152. <https://doi.org/10.1007/s12145-013-0132-4>
5. Chen, G., Li, W.Q., Kong, Q.Q., et al. (2012). Recent progress of marine geographic information system in China: A review for 2006–2010. *Journal of ocean university of China*, 11, 1, 18–24. <https://doi.org/10.1007/s11802-012-1825-x>
6. Uyaguari, A., Espinosa-Gallardo, E., Jácome-Guerrero S.P., et al. (2018). Open source web software architecture components for geographic information systems in the last 5 years: A systematic mapping study. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 721, 688–699. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7_65.
7. Usmani, R. S. A., Hashem, I. A. T., Pillai, T. R., et al. (2020). Geographic information system and big spatial data: A review and challenges. *International Journal of Enterprise Information Systems*, 16(4), 101–145. <https://doi.org/10.4018/IJEIS.2020100106>
8. Quan, S. J., & Bansal, P. (2021). A systematic review of GIS-based local climate zone mapping studies. *Building and Environment*, 196, 107791. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107791>
9. Chan, S. W., Abid, S. K., Sulaiman, N., et al. (2022). A systematic review of flood vulnerability using geographic information systems. *Heliyon*, 8(3), e09075. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09075>

10. Yang, Z. L., Lu, H., Zhang, Z. J., et al. (2023). Visualization analysis of rainfall-induced landslide hazards based on remote sensing and geographic information systems: An overview. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 2374–2402. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2229797>
11. Minh, D. T. (2023). Criteria affecting groundwater potential: A systematic review of literature. In *Advances in research on water resources and environmental systems* (pp. 85–110). https://doi.org/10.1007/978-3-031-17808-5_7
12. Altarez, R. D. D., Apan, A., & Maraseni, T. (2024). The perspectives of remote sensing and GIS on military environmental impacts: A systematic review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(1), 113. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13514-0>
13. Wang, X., & Liu, Z. (2024). Navigating aged care services with GIS: Trends, developments, and future directions. *BMC Geriatrics*, 24(1), 243. <https://doi.org/10.1186/s12877-024-04799-4>
14. Cinar, K., Kavacik, S. Z., & Erul, E. (2025). Bibliometric analysis of GIS-based tourism research: Trends, topics, and future directions in terms of sustainable tourism management. *SAGE Open*, 15(2), 21582440251335733. <https://doi.org/10.1177/21582440251335733>
15. Cook, D., & Petursson, J. G. (2025). The role of GIS mapping in multi-criteria decision analysis in informing the location and design of renewable energy projects: A systematic review. *Energy Strategy Reviews*, 59, 101765. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101765>
16. Lytvynov, V. V., Shynder, V. S., Kozhevnykov, V. A. ta in. (2000). Arhitektura programnykh system avtomatyzatsii biznes-protsesiv pidpriemstva z vykorystanniam HIS ta Internet tekhnolohii. *Mat. mashyny i systemy*, 1, 81–93. (in Ukrainian).
17. Shypulin, V. D., Patrakeiev, I. M., Tolstokhatko, V. A., ta in. (2014). Informatsiino-komunikatsiini tekhnolohii u formuvanni miskoho seredovyshcha (V. T. Semenov, Ed.). Kharkiv: Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O.M. Beketova, (in Ukrainian).
18. Kis, Ya. P., Shakhovska, N. B., Valchuk, O. B. (2008). Intelktualni heoinformatsiini systemy. Mizhnarodnyi dosvid ta shliakhy rozvytku v Ukraini. *Visn. Nats. un-tu "Lviv. politekhnika"*, 621, 139–143. <https://vlp.com.ua/node/658> (in Ukrainian).
19. Karpinskyi, Yu., Liashchenko, A., Makarenko, D., & Cherin, A. (2021). Natsionalna infrastruktura heoprosorovykh danykh Ukrainy u svitovomu vymiri: stan ta nahalni zavdannia rozvytku i staloho funktsionuvannia. *Suchas. dosiahnennia heodez. nauky ta vyr-va*, 1, 104–112. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/59203> (in Ukrainian).
20. Kopiika, O. V. (2024). Heoinformatyka v systemakh pidtrymky pryiniattia rishen. *Nauk. zapysky Maloi akademii nauk Ukrainy*, 2, 37–47. <https://doi.org/10.51707/2618-0529-2024-30-04> (in Ukrainian).
21. Luo, Y., Wang, X., Xiong, G., & Xu, Z. (2005). Design hierarchical component-based WebGIS. *Lecture Notes in Computer Science*, 3516 (III), 515–522. https://doi.org/10.1007/11428862_71.
22. Fangli, N., Kang, W., & Juan, W. (2010). Designing and realization of campus WebGIS based on ArcGIS server. In *Proceedings of the 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering* (Vol. 5, pp. 72–75).
23. Ye, K., & Guo, Y. (2012). The design and research of the next generation of ERP based on GPS and GIS. *Advanced Materials Research*, 403–408, 1736–1739. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.403-408.1736>
24. Manick, N., Appigadoo, A., & Cadarsaib, Z. (2019). ERP and GIS relevance for fire rescue services. In *Proceedings of the 2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence* (pp. 922–929). <https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701261>
25. Soliman, A., & Terstriep, J. (2020). Leveraging geospatial data gateways to support the operational application of deep learning models: Vision paper. In *Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems* (pp. 593–596). <https://doi.org/10.1145/3397536.3422232>
26. Khan, R. A., Bibi, M., Khokhar, M., & Tufail, M. M. B. (2024). Geographic information system and AI integration to support sustainable environment: A glance from the construction

- sector. In *Harnessing AI in Geospatial Technology for Environmental Monitoring and Management* (pp. 145–175). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8104-5.ch007>
27. Martinez, J. V. Y., Skarmeta, A. F., Zamora-Izquierdo, M. A., & Ramallo-Gonzalez, A. P. (2020). IoT-based data management for smart agriculture. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded and Distributed Systems* (pp. 41–46). <https://doi.org/10.1109/EDiS49545.2020.9296443>
28. Gao, Y., Xiong, G., Hu, Z., et al. (2024). Bridge digital twin for practical bridge operation and maintenance by integrating GIS and BIM. *Buildings*, 14(12), 3731. <https://doi.org/10.3390/buildings14123731>
29. Tan, F., & Cheng, Y. (2024). A digital twin framework for innovating rural ecological landscape control. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00888-8>
30. Rudenko, L. H. (2001). Heohrafichna kartohrafiia v Ukraini ta yii znachennia u heoinformatsiinomu prostori. *Ukr. heohr. zhurn.*, 3, 110–113. (in Ukrainian).
31. Nesterenko, O. V. (2000). Vykorystannia HIS-tehnolohii pry orhanizatsii danykh v orhanakh derzhavnoi vlyady. *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh*, 2, 1, 60–66. (in Ukrainian).
32. Nesterenko, O. V. (2000). Heoinformatsiini tehnolohii ta intehtatsiia informatsiino-analitychnykh system orhaniv derzhavnoi vlyady Ukrainy. *Visnyk heodezii ta kartohrafiu*, 2(17), 33–37. (in Ukrainian).
33. Zablotskyi, V. H., & Shkil, V. O. (2000). Otsinka stanu natsionalnoi bezpeky Ukrainy z vykorystanniam heoinformatsiinykh tehnolohii. *NTI*, 3, 3–8. (in Ukrainian).
34. Karpinskyi, Yu. O., & Liashchenko, A. A. (2002). Shliakhy stanovlennia natsionalnoi infrastruktury prostorovykh danykh ta intehtatsii Ukrainy v svitovyi heoinformtsiinyi prostir. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Heohrafiia*, 15 (54), 1, 3–11. (in Ukrainian).
35. Karpinskyi, Yu. O., & Liashchenko, A. A. (2004). Shliakhy rozvytku standartyzatsii ta sertyfikatsii heohrafichnoi informatsii / heomatyky v Ukraini. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Heohrafiia*, 17 (56), 2, 105–110. (in Ukrainian).
36. Lialko, V. I., Popov, M. O., Zubko, V. P., & Riabokonenko, O. D. (2004). Stan ta perspektyvy rozvytku dystantsiinykh metodiv doslidzhennia Zemli v Ukraini. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Heohrafiia*, 17 (56), 2, 64–71. (in Ukrainian).
37. Nesterenko, O. V. (2004). Vykorystannia heoinformatsiinykh tehnolohii dlia zabezpechennia systemy elektronnoho uriadu. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Heohrafiia*, 17 (56), 2, 99–104. (in Ukrainian).
38. Lykhohrud, M. H., Seredynyn, Ye. S., Diadiun, V. Yu. ta in. (2002). Standart bazy heohrafichnykh danykh avtomatyzovanoi systemy derzhavnoho zemelnogo kadastru Ukrainy (realizatsiia dlia platformy ESRI ArcGIS 8.kh). *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Heohrafiia*, 15 (54), 1, 12–32. (in Ukrainian).
39. Dyshlyk, O. P., & Markov, S. Iu. (2007). Pidkhody do stvorennia kartofachnoi osnovy atlasu rynkovykh tsin zemel v naselenomu punkti. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Heohrafiia*, 20 (59), 1, 22–28. (in Ukrainian).
40. Nesterenko, O. V. (2005). Heoinformatsiine suspilstvo. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Heohrafiia*, 18 (57), 1, 103–110. (in Ukrainian).
41. Barladin, O. V., Mykolenko, L., & Skliar, O. Iu. (2012). Heoinformatsiinyi proekt z reahuvannia na nadzvychaini sytuatsii z bazamy danykh ta infrastrukturoiu Kyivskoi oblasti. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Heohrafiia*, 25 (64), 1, 7–13. (in Ukrainian).
42. Ishchuk, O. O. (2012). HIS v otsintsi ryzykiv vid ekstremalnykh sytuatsii, vyklykanykh navodkami i vodopilliam. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Heohrafiia*, 25 (64), 1, 86–94. (in Ukrainian).

43. Putrenko, V. V. (2012). Vykorystannia khmarnykh servisiv dlia tematychnoho kartohrafuvannia. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu im. V. I. Vernadskoho. Serii: Heohrafiia*, 25 (64), 1, 191–199. (in Ukrainian).
44. Peresadko, V., Saulenko, O., & Bainazarov A. (2019). Istoriia i perspektyvy zastosuvannia heoinformatsiinykh system u navchalnomu protsesi z heohrafi. *Problemy bezperervnoi heohrafichnoi osvity i kartohrafi*, 30, 81–93. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2019-30-09> (in Ukrainian).
45. Melnyk, A. V. (2008). Problemy i mozhlyvosti rozvytku heoinformatsiinoi osvity v Ukraini. *Ukr. heohr. zhurn.*, 4, 48–51. (in Ukrainian).
46. Tymchenko, S. I. (2024). Kontseptsiiia tsyfrovizatsii dorozhno-infrastrukturykh proiektiv v Ukraini: vykorystannia heoinformatsiinykh tekhnolohii dlia pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, 60, 95–104. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.95-104> (in Ukrainian).
47. Pomortseva, O. Ye., Kobzan, S. M., & Shterdok, E. S. (2023). Vykorystannia heoinformatsiinykh tekhnolohii pry vedenni boiovykh dii v suchasnykh umovakh. *Komunalne hospodarstvo mist. Serii: Tekhnichni nauky ta arkhitektura*, 1, 69–73. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-69-73> (in Ukrainian).
48. Bialyi, M. O. (2024). Otsinka informatyvnosti heoinformatsiinykh system viiskovoho pryznachennia. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 3, 132–142. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3\(37\)-132-142](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3(37)-132-142) (in Ukrainian).
49. Chabaniuk, V. S., & Dyshlyk, O. P. (2023). Do pytannia stratehii vykorystannia heoinformatsiinykh system i tekhnolohii dlia upravlinnia terytorieiu. *Zemleustrii, kadastr i monitorynh zemel*, 3, 110–130. (in Ukrainian).
50. Lebid, O. H., Okhariev, V. O., Fedoseienkov, S. H. ta in. (2023). Heoinformatsiini tekhnolohii ekolohichnoho monitorynhu akvatorii Chornoho moria pislia ruinuvannia Kakhovskoi HES. *Ekol. bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 4, 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144> (in Ukrainian).
51. Pyrikov, O. V. (2022). Heoinformatsiinyi systemnyi pidkhid do analizu vplyvu zbroinykh konfliktiv na ekolohichni stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha. *Ekol. bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 1 (41), 5–17. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.5-17> (in Ukrainian).
52. Nedosnovanyi, O. Yu., Cherniak, O. I., & Holinko, V. V. (2023). Porivnialnyi analiz khmarnykh servisiv dlia obrobky heoinformatsiinykh danykh. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia*, 2, 50–57. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-57-2-50-57> (in Ukrainian).
53. Minaiev, D., & Radelytskyi, Yu. (2023). Klasyfikatsiia vytrat ahrodiialnosti z pozytsii obliku i kontroliu v umovakh vykorystannia heoinformatsiinykh tekhnolohii. *Visnyk ekonomiky*, 3, 97–114. <https://doi.org/10.35774/visnyk2023.03.097> (in Ukrainian).

The article was received 11.11.25, received after revision 26.01.26, accepted 23.02.26

Нестеренко Олександр Васильович

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, Міжнародний європейський університет

Адреса робоча: 03187, Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42В

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5329-889X> e-mail: oleksandr_nesterenko@ieu.edu.ua

Яцук Петро Петрович

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій, Міжнародний європейський університет

Адреса робоча: 03187, Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42В

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-7124-4849> e-mail: petro_yatsuk@ieu.edu.ua

УДК 004.91:004.62

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

Yurii Abroskin, graduate student, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9828-5596> **e-mail:** abroskin21@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

Tetyana Prosyankina-Zharova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, senior researcher, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9623-8771> **e-mail:** t.puman@gmail.com

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

ANALYSIS OF TEXT ANALYTICS METHODS FOR KNOWLEDGE EXTRACTION FROM UKRAINIAN-LANGUAGE SOCIAL MEDIA

Abstract. *The purpose of the study is to review and systematize current text analytics and natural language processing methods for knowledge extraction from unstructured social media content, with a focus on Ukrainian-language sources.*

A comparative analysis of topic modelling methods (LSA, NMF, LDA, HDP, Top2Vec, BERTopic), ontology construction approaches, OSINT data collection tools, and the F1 evaluation metric for named entity recognition tasks was conducted.

Comparative analysis of four topic modelling methods applied to real Twitter datasets demonstrated that BERTopic (coherence score 0.62) outperforms LDA (0.45) and Top2Vec (0.56) for short texts; the NER-UK 2.0 corpus provides a baseline solution for Ukrainian named entity recognition with an F1 score of 0.89. Theoretically, the selection of methods that take into account the temporal dynamics of topics is justified. Practically, five-block pipeline architecture for knowledge extraction from Ukrainian-language social media is proposed.

The originality of the work lies in the adaptation of the Methontology-based approach to ontology generation for short unstructured Ukrainian-language texts. Further prospects include practical implementation and validation of the proposed pipeline on real Ukrainian social media datasets.

Keywords: *text analytics, data processing, Coherence Score, F1-score, LSA, NMF, LDA, Top2Vec, BERTopic, OSINT.*

О.М. Терентьев, Ю.Ю. Аброскін, В.О. Дуда, Т.І. Просянкіна-Жарова

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

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТЕКСТОВОЇ АНАЛІТИКИ ДЛЯ ВИДОБУВАННЯ ЗНАНЬ З УКРАЇНОМОВНОГО КОНТЕНТУ СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖ

Анотація. Мета дослідження полягає в аналізі та систематизації сучасних методів текстової аналітики для видобування знань із соціальних мереж з акцентом на україномовний контент. Було виконано порівняльний аналіз шести методів тематичного моделювання (LSA, NMF, LDA, HDP, Top2Vec, BERTopic), підходів до побудови онтологій та графів знань, інструментів OSINT, а також метрики F1 для оцінювання завдань розпізнавання іменованих сутностей.

Порівняльний аналіз методів тематичного моделювання на реальних наборах повідомлень показав, що BERTopic (когерентність 0,62) перевищує LDA (0,45) і Top2Vec (0,56) на коротких текстах; корпус NER-UK 2.0 забезпечує базове рішення NER для української мови з точністю $F1 = 0,89$.

Теоретично обгрунтовано вибір методів з урахуванням часової динаміки тем, для подальшого використання в дисертаційному дослідженні. Запропоновано концептуальну архітектуру п'ятиблокового конвеєру, для практичного використання.

Оригінальність дослідження полягає в адаптації загальновідомого підходу під назвою Methontology до генерації онтологій для коротких неструктурованих україномовних текстів.

Перспективи подальшої роботи – практична реалізація та апробація конвеєру на реальних даних україномовних соціальних мереж.

Ключові слова: текстова аналітика, обробка даних, коефіцієнт узгодженості тем, F1-метрика, LSA, NMF, LDA, Top2Vec, BERTopic, OSINT.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.161-170>

Вступ

Видобування знань із текстових масивів соціальних мереж є актуальним завданням, яке дозволяє аналізувати суспільні настрої, виявляти тренди та здійснювати моніторинг інформаційного простору. Як зазначають фахівці [1], соціальні платформи накопичують значні обсяги неструктурованого тексту, опрацювання якого потребує застосування комплексу методів інтелектуального аналізу даних. Для україномовного контенту зазначена задача має особливу специфіку через мовні особливості онлайн-комунікації та обмеженість спеціалізованих інструментів до 2022 року.

Завдання автоматизованого аналізу громадської думки через соціальні мережі активно досліджується як для загальних [4, 6], так і для кризових контекстів [5]. Зокрема, дослідження україномовних повідомлень засобами NLP (Natural Language Processing – обробка природньої мови), машинного навчання [2] та виявлення дезінформації в українському медіапросторі [3] демонструють зростаючий інтерес до цієї предметної галузі. Довід авторського колективу в кластеризації новинних текстів методом SVD (Singular Value Decomposition – сингулярне розкладання) із використанням системи SAS Enterprise Miner [20] (SAS – Statistical Analysis System) також підтвердив практичну цінність автоматизованого текстового аналізу для виявлення тематичних груп і трендів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Порівняльний аналіз методів тематичного моделювання для коротких текстів із соціальних мереж став предметом низки сучасних досліджень. У дослідженні [8] виконано порівняння таких методів, як LDA (Latent Dirichlet Allocation – латентне розподілення Діріхле), NMF (Non-negative Matrix Factorization – невід’ємна матрична факторизація), Top2Vec (Topic to Vector – від теми до вектору) та BERTopic (тематичне моделювання на основі BERT-овської моделі), на корпусі, що складається з 31 800 текстових повідомлень. У роботі [9] дослідниками проведено аналогічне порівняння на твітах із хештегом #covidtravel. Обидва дослідження [8, 9] продемонстрували узгоджені результати щодо переваг методів BERTopic та NMF над LDA та Top2Vec у разі обробки коротких текстів. Американські дослідники Анкан Саха та Вікас Сіндхвані в роботі [10] розробили підхід Dynamic NMF (Dynamic Non-negative Matrix Factorization) з часовою регуляризацією, призначений для відстеження еволюції тем у соціальних мережах протягом часу.

З позиції видобування знань із соціальних медіа та побудови онтологій показовою є робота [1], у якій для текстів Facebook застосовано комплекс технік кластеризації та тематичного моделювання. Огляд методів побудови онтологій на основі тексту [14] систематизує підходи – від простого вилучення термінів до повністю автоматизованих рішень на базі великих мовних моделей. Для задач побудови графів знань та встановлення семантичних зв’язків між сутностями ефективним визнано підхід, описаний у роботі [15].

У контексті україномовної обробки природної мови ключовим ресурсом є корпус NER-UK 2.0 (NER – Named Entity Recognition) [7], який забезпечує основу для розпізнавання іменованих сутностей в українських текстах різних жанрів, зокрема в дописах соціальних мереж.

Мета дослідження

Метою дослідження є аналіз та порівняння існуючих методів текстової аналітики за кількісними та якісними критеріями, а також обґрунтування вибору підходів для розробки інформаційної технології видобування знань з україномовного контенту соціальних мереж.

Теоретичні основи дослідження

Методи тематичного моделювання

Тематичне моделювання дає змогу автоматично виявляти приховані смислові структури в текстових корпусах. Методи LSA та NMF належать до алгебраїчних методів, які здійснюють факторизацію матриці «термін–документ». Метод NMF застосовує TF-IDF-зважування (Term Frequency – Inverse Document Frequency) та обмеження невід’ємності, що забезпечує вищу точність виявлення тем порівняно з методом LSA [9]. У свою чергу метод LDA є імовірнісною байєсівською моделлю, у якій документ розглядається як суміш тем, а тема – як розподіл над словниковим запасом. Для відстеження змін тем у часі розроблено Dynamic Topic Model (DTM), що розширює LDA шляхом урахування часових зрізів [10].

BERTopic підхід базується на трансформерних моделях для отримання щільних векторних представлень документів, після чого застосовує алгоритм UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection – рівномірна апроксимація та проєкція багатовиду) для зменшення розмірності та HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise – алгоритм ієрархічної щільнісної просторової кластеризації з урахуванням шуму) для кластеризації. Порівняно з LDA та NMF, метод BERTopic краще справляється з короткими та семантично неоднозначними текстами соціальних мереж [8, 9]. Top2Vec має подібний підхід, проте поступається BERTopic у чіткості розмежування тем і генерує більшу кількість перекриваючих кластерів [8].

Метрика Coherence Score для оцінювання тематичних моделей

Для об'єктивного порівняння методів тематичного моделювання без залучення ручної експертної оцінки використовується метрика Coherence Score (коефіцієнт узгодженості тем). Задачу автоматичного оцінювання узгодженості тем уперше систематично сформулювали Девід Ньюман, Джей Хан Лау, Карл Грізер та Тімоті Болдуїн в своїй роботі [11], встановивши, що міра на основі взаємної точкової інформації (PMI – Pointwise Mutual Information), розрахована на корпусі всесвітньо відомої Інтернет-енциклопедії Wikipedia, досягає рівня кореляції з оцінками людей $\rho = 0,78$ (за коефіцієнтом кореляції Спірмена) для новинних текстів. Пізніше дослідники Міхаель Редер, Андреас Бот та Олександр Хіннебург в своєму дослідженні [12] запропонували уніфікований фреймворк, що охоплює всі відомі міри когерентності. Найкраща з виявлених ними мір – C_v , яка поєднує непряму косинусну подібність із нормалізованою PMI (NPMI – Normalized Pointwise Mutual Information) та ковзним вікном, досягаючи середньої кореляції з людськими оцінками 0,731.

Загальна формула метрики коефіцієнта узгодженості тем UCI (скорочено C_{uci} від UCI coherence), для окремої теми, описаної множиною з N ключових слів $W = \{w_1, \dots, w_N\}$, визначається як нормована сума попарних PMI-оцінок [12]:

$$C_{UCI} = \frac{2}{N \cdot (N - 1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N PMI(w_i, w_j), \quad (1)$$

де

$$PMI(w_i, w_j) = \log \frac{P(w_i, w_j) + \varepsilon}{P(w_i) \cdot P(w_j)}, \quad (2)$$

Значення ймовірностей, $P(w_i)$ – появи i -го слова та $P(w_i, w_j)$ – сумісної появи одночасно i -го та j -го слів, оцінюються на основі статистики спільної зустрічальності слів у ковзному вікні на великому корпусі текстів. Значення коефіцієнта узгодженості тем належить до інтервалу $[0; 1]$, де більше значення відповідає кращій інтерпретованості теми. На матеріалі двох реальних наборів даних коротких текстів BERTopic досяг найвищого значення 0,62, в той час як LDA лише 0,45 [13].

Метрика F1 для оцінювання результатів NLP

Ключовою метрикою для оцінювання задач обробки природної мови, зокрема розпізнавання іменованих сутностей (NER), є міра F1. Вона поєднує точність (Precision, позначається як P) та повноту (Recall, позначається як R) в одному показнику. Пітер Крістен, Девід Дж. Хенд та Нішаді Кіріелле в своєму дослідженні [19] у ґрунтовному огляді зазначають, що F1 є гармонійним середнім P та R і обчислюється за формулою:

$$F_1 = \frac{2 \cdot P \cdot R}{P + R} = \frac{2 \cdot TP}{2 \cdot TP + FP + FN}, \quad (3)$$

де TP (true positives) – кількість вірно ідентифікованих сутностей; FP (false positives) – хибно визначені сутності; FN (false negatives) – пропущені сутності. Значення $F1 \in [0; 1]$, де 1 відповідає ідеальному результату. Ця метрика вважається стандартом оцінювання NER-систем на наборах даних CoNLL (<https://huggingface.co/datasets/eriktks/conll2003>) та ACE (<https://catalog.ldc.upenn.edu/LDC2006T06>) [19], що використовуються фахівцями для тестування моделей. Для корпусу NER-UK 2.0 [7] базова модель на основі RoBERTa-large досягає зваженого значення $F1 = 0,89$ на 13 категоріях іменованих сутностей в українських текстах.

Побудова онтологій та графів знань

Онтологія в контексті інформаційних систем являє собою формальний опис понять предметної галузі та відносин між ними. У роботі [14] Олександр Маедхе та Штеффен Штааб виокремлюють п'ять ступенів автоматизації процесу побудови онтологій: від ручного проєктування в програмі Protege [18] до повної автоматизації на основі великих мовних моделей [16]. Для забезпечення структурованого збереження даних та їхньої сумісності використовується технологічний стек RDF (Resource Description Framework – стандарт для представлення даних у вигляді графу знань), OWL (Web Ontology Language – мова для опису онтологій) та SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language – мова запитів для роботи з даними в форматі RDF). Реалізація послідовних фаз за методологією Methontology (від специфікації до імплементації) може бути відтворена через формування структурованих інструкцій (промптів) для сучасних LLM (великих мовних моделей) [16].

Природним інструментом для візуалізації виявлених сутностей та існуючих між ними зв'язків виступають графи знань [15]. В умовах аналізу соціальних платформ вузлами графа стають відповідні концепти (особи, локації, організації чи події), а ребрами – встановлені семантичні відношення. Поєднання тематичного моделювання з графовими технологіями дозволяє не лише окреслювати коло тем, а й фіксувати концептуальні взаємозв'язки між ними.

Результати дослідження

Порівняльний аналіз методів тематичного моделювання

На основі проведеного огляду літератури складено порівняльну характеристику шести методів тематичного моделювання за п'ятьма якісними критеріями (таблиця 1).

Таблиця 1. Якісне порівняння методів тематичного моделювання

Метод	Підхід	Динаміка у часі	Придатність для коротких текстів	Підтримка укр. мови
LSA	Матрична факторизація (SVD)	Обмежена	Слабка	Потребує адаптації
NMF	Матрична факторизація (TF-IDF)	Обмежена	Добра	Потребує адаптації
LDA	Басівський генеративний	Через DTM	Середня	Так (з корпусом)
HDP	Непараметричний байесівський	Часткова	Середня	Так (з корпусом)
Top2Vec	Векторні вкладення	Обмежена	Добра	Так (mBERT)
BERTopic	Трансформерні моделі	Висока	Висока	Так (uk-BERT, mBERT)

Кількісне порівняння методів тематичного моделювання здійснено на підставі даних дослідження з роботи [11], виконаного на двох реальних наборах даних, що містять короткі тексти. Перший набір даних складається з 29 200 коротких відгуків користувачів державного порталу ОАЕ, другий набір даних складається з 1 600 готельних відгуків платформи TripAdvisor. Оцінювання проводилось при двох значеннях кількості тем ($k = 5$ та $k = 10$) за метрикою коефіцієнта узгодженості тем. Отримані результати порівняння наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Значення метрики коефіцієнта узгодженості тем для різних методів тематичного моделювання [13]

Метод	Перший набір даних, $k = 5$	Перший набір даних, $k = 10$	Другий набір даних, $k = 5$	Другий набір даних, $k = 10$
LSA	0,5	0,53	0,46	0,39
NMF	0,49	0,5	0,33	0,31
LDA	0,45	0,4	0,42	0,48
PAM	0,49	0,44	0,32	0,31
Top2Vec	0,56	0,54	0,38	0,33
BERTopic	0,62	0,56	0,58	0,6

З таблиці 2 видно, що BERTopic демонструє найвище значення коефіцієнта узгодженості тем на обох датасетах (0,62 та 0,58 при $k = 5$), що підтверджує його перевагу для коротких неструктурованих текстів. Примітно, що метод NMF показує близькі до BERTopic результати на першому наборі даних (0,49), однак суттєво поступається на другому наборі даних (0,33) – тобто його ефективність залежить від характеру вхідних даних. LDA демонструє відносно стабільні результати на обох наборах даних і зберігає перевагу для часового аналізу завдяки розширенню DTM [10]. Окремо варто зазначити, що для задачі розпізнавання іменованих сутностей в україномовних текстах корпус NER-UK 2.0 забезпечує базовий рівень $F1 = 0,89$ на 13 категоріях сутностей [7], що підтверджує достатність наявної NLP-інфраструктури для реалізації запропонованої архітектури.

Аналіз підходів до побудови онтологій

Порівняння підходів до побудови онтологій здійснювалося за трьома критеріями: рівень автоматизації, адаптованість до неструктурованого контенту та підтримка україномовних текстів. Ручний підхід на основі використання програми Protege [18] забезпечує найвищу якість, але потребує значних зусиль експерта з відповідної предметної області. NER-технологічні процеси на базі використання NER-UK 2.0 [7] є частково автоматизованим та безпосередньо придатним для україномовних текстів. LLM-підхід [16] із структурованими Methontology-промптами є найбільш автоматизованим, проте розроблявся для структурованих англійських документів і потребує адаптації для коротких дописів у соціальних мережах.

Концептуальна архітектура інформаційної технології

На основі проведеного аналізу запропоновано концептуальну архітектуру у вигляді п'ятиблокового конвеєру для видобування знань з україномовного контенту соціальних мереж (рис. 1).

Блок 1. Збір даних (OSINT-модуль). Автоматизований збір текстового контенту та метаданих з платформ Telegram, YouTube, Facebook через офіційні API. Разом із текстом фіксуються метрики залученості (перегляди, реакції, коментарі, репости) та часова мітка публікації.

Блок 2. Попередня NLP-обробка. Токенізація, лематизація, морфологічний аналіз та видалення стоп-слів із використанням інструментарію для укр. мови: моделей на базі BERT та корпусу NER-UK 2.0 [7] для розпізнавання іменованих сутностей.

Блок 3. Тематичне моделювання та кластеризація. Виявлення латентних тематичних структур із використанням LDA/HDP або BERTopic. Для аналізу динаміки застосовується часово-зрізовий підхід [10]: корпус розбивається на часові вікна, а міжвіконне зіставлення дозволяє відстежувати еволюцію тематик.

Блок 4. Побудова онтологій та графів знань. На основі виявлених тем та іменованих сутностей автоматично будуються онтологічні структури у форматі OWL за принципами Methontology [16]: (1) глосарій термінів, (2) таксономія концептів, (3) ситуативні зв'язки. Графи знань формуються на основі семантичної близькості та спільної зустрічальності сутностей у темах.

Блок 5. Візуалізація та інтерпретація. Відображення виявлених тем, часової динаміки та концептуальних зв'язків. Інтеграція метрик залученості дозволяє ранжувати теми за ступенем резонансності в аудиторії.

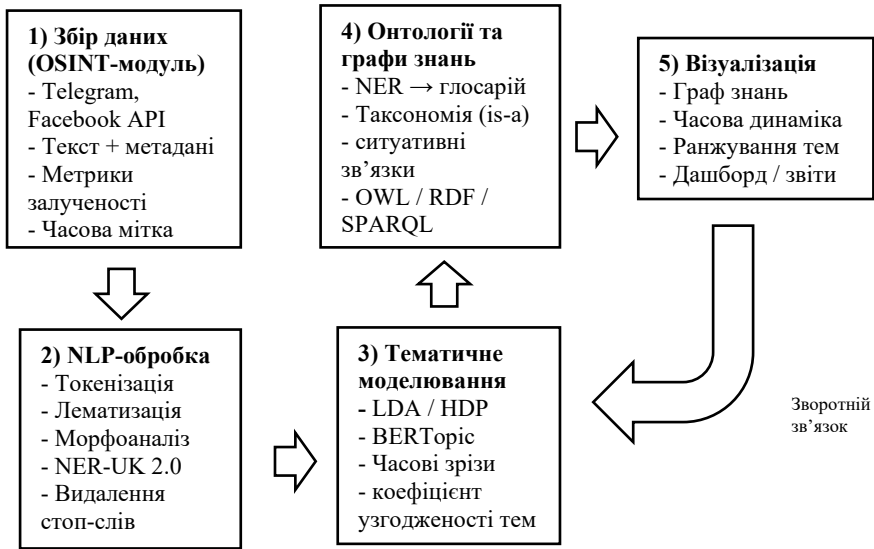


Рис. 1. Концептуальна архітектура конвеєрної системи для видобування знань з україномовного контенту соціальних мереж

Висновки

У статті проведено аналіз та порівняння методів текстової аналітики для задачі видобування знань з україномовного контенту соціальних мереж. Отримано наступні результати:

1. за результатами кількісного порівняння [13] встановлено, що BERTopic (коефіцієнт узгодженості тем = 0,62) перевищує LDA (0,45) та Top2Vec (0,56) для коротких неструктурованих текстів, що обґрунтовує вибір BERTopic як основного методу тематичного моделювання в запропонованій архітектурі;

2. показано, що корпус NER-UK 2.0 [7] із базовим F1 = 0,89 є практичним інструментом для розпізнавання іменованих сутностей у 13 категоріях українських текстів, включно з контентом соціальних мереж;

3. обґрунтовано, що LLM-підхід до автоматичної побудови онтологій [14] на базі відомої методики Methontology є перспективним, але потребує адаптації під специфіку коротких україномовних текстів соціальних мереж – на відміну від структурованих технічних документів, для яких він розроблявся;

4. запропоновано концептуальну архітектуру п'ятиблокової конвеєру (OSINT, NLP-обробка, тематичне моделювання, онтології, візуалізація), що інтегрує метрики залученості аудиторії та дозволяє відстежувати часову динаміку тем.

Практичне значення полягає в тому, що запропонована архітектура може стати основою для розробки системи моніторингу україномовного інформаційного простору. Перспективи подальших досліджень – практична реалізація конвеєру, дослідження ефективності BERTopic із моделями uk-BERT на реальних україномовних даних соціальних мереж та розробка спеціалізованих онтологій для обраних предметних областей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Salloum, S. A., Al-Emran, M., & Shaalan, K. (2017). Mining social media text: Extracting knowledge from Facebook. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 6(2), 73–81. https://www.researchgate.net/publication/314095118_Mining_Social_Media_Text_Extracting_Knowledge_from_Facebook
2. Prokipchuk, O., Vysotska, V., Pukach, P., Lytvyn, V., Uhryn, D., Ushenko, Yu., & Hu, Z. (2023). Intelligent analysis of Ukrainian-language tweets for public opinion research based on NLP methods and machine learning technology. *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 15(3), 70–93. <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2023.03.06>
3. Vysotska, V., Przystupa, K., Kulikov, Yu., Chyrun, S., Ushenko, Yu., Hu, Z., & Uhryn, D. (2025). Recognizing fakes, propaganda and disinformation in Ukrainian content based on NLP and machine-learning technology. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 17(1), 92–127. <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2025.01.08>
4. Vysotska, V., Mazepa, S., Chyrun, L., Brodyak, O., Shakleina, I., & Schuchmann, V. (2022). NLP tool for extracting relevant information from criminal reports or fakes/propaganda content. *Proceedings of the IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 93–98. <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000563>
5. Ozyurt, B., & Akcayol, M. A. (2023). A deep learning-based sentiment analysis approach (MF-CNN-BILSTM) and topic modeling of tweets related to the Ukraine-Russia conflict. *Applied Soft Computing*, 143, 110404. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110404>
6. Liao, H., Wang, C., Gu, Y., & Liu, R. (2025). A text data mining-based digital transformation opinion thematic system for online social media platforms. *Systems*, 13(3), 159. <https://doi.org/10.3390/systems13030159>
7. Chaplinskyi, D., & Romanyshyn, M. (2024). Introducing NER-UK 2.0: A rich corpus of named entities for Ukrainian. *Proceedings of the Third Ukrainian Natural Language Processing Workshop (UNLP) @ LREC-COLING 2024*, 23–29. <https://aclanthology.org/2024.unlp-1.4>
8. Ramamoorthy, T., Kulothungan, V., & Mappillairaju, B. (2024). Topic modeling and social network analysis approach to explore diabetes discourse on Twitter in India. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7, 1329185. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1329185>
9. Egger, R., & Yu, J. (2022). A topic modeling comparison between LDA, NMF, Top2Vec, and BERTopic to demystify Twitter posts. *Frontiers in Sociology*, 7, 886498. <https://doi.org/10.3389/fsoc.2022.886498>
10. Saha, A., & Sindhvani, V. (2012). Learning evolving and emerging topics in social media: A dynamic NMF approach with temporal regularization. *Proceedings of the Fifth ACM International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM '12)*, 693–702. <https://doi.org/10.1145/2124295.2124376>
11. Newman, D., Lau, J. H., Grieser, K., & Baldwin, T. (2010). Automatic evaluation of topic coherence. *Human Language Technologies: The 2010 Annual Conference of the North American Chapter of the ACL*, 100–108. <https://aclanthology.org/N10-1012>
12. Röder, M., Both, A., & Hinneburg, A. (2015). Exploring the space of topic coherence measures. *Proceedings of the Eighth ACM International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM '15)*, 399–408. <https://doi.org/10.1145/2684822.2685324>
13. Krishnan, A., & Kennedyraj. (2023). Exploring the power of topic modeling techniques: A comparative analysis. *arXiv preprint arXiv:2308.11520*. <https://arxiv.org/abs/2308.11520>
14. Maedche, A., & Staab, S. (2001). Ontology learning from text: A survey. *IEEE Intelligent Systems*, 16(4), 72–79. https://doi.org/10.1007/3-540-45399-7_30
15. Ji, S., Pan, S., Cambria, E., Marttinen, P., & Philip, S. Y. (2021). A survey on knowledge graphs: Representation, acquisition, and applications. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 33(2), 494–514. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3070843>

16. Tupayachi, J., Xu, H., Omitaomu, O. A., Camur, M. C., Sharmin, A., & Li, X. (2024). Towards next-generation urban decision support systems through AI-powered construction of scientific ontology using large language models. *arXiv preprint* arXiv:2405.19255. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.19255>
17. Boutaleb, A., Picault, J., & Grosjean, G. (2024). BERTrend: Neural topic modeling for emerging trends detection. *arXiv preprint* arXiv:2411.05930. <https://arxiv.org/abs/2411.05930>
18. Noy, N. F., Sintek, M., Decker, S., Crubezy, M., Ferguson, R. W., & Musen, M. A. (2001). Creating semantic web contents with Protege-2000. *IEEE Intelligent Systems*, 16(2), 60–71. <https://doi.org/10.1109/5254.920601>
19. Christen, P., Hand, D. J., & Kirielle, N. (2023). A review of the F-measure: Its history, properties, criticism, and alternatives. *ACM Computing Surveys*, 56(3), 73. <https://doi.org/10.1145/3606367>
20. Mühlroth, C., & Grottko, M. (2022). Artificial intelligence in innovation: How to spot emerging trends and technologies. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 69(2), 493–510. <https://doi.org/10.1109/TEM.2020.2989214>
21. Terentiev, O. M., Duda, V. O., & Abroskin, Yu. Yu. (2025). Analiz tekstovoi informatsii z metoiu klasteryzatsii ta vyjavlennia hrup ekonomichnykh novyn shchodo auktsioniv Ministerstva finansiv iz zaluchennia zovnishnoho finansuvannia [Analysis of textual information for clustering and identification of groups of economic news on Ministry of Finance auctions for external financing]. Development of Education, Science and Business: Results 2025: *Proceedings of the International Scientific and Practical Internet Conference*, December 18–19, 2025, 511–513. FOP Marenichenko V.V., Dnipro, Ukraine. ISBN 978-617-8293-60-4. ISSN 2664-4819. <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2025/12/Conference-Proceedings-December-18-19-2025.pdf> (in Ukrainian)

Стаття надійшла до редакції 13.01.26, надійшла після рецензування 16.02.26, прийнята 06.03.26

The article was received 13.01.26, received after revision 16.02.26, accepted 06.03.26

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

Аброскін Юрій Юрійович

аспірант, Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9828-5596> **e-mail:** abroskin21@gmail.com

Дуда Володимир Олександрович

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

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

Присянкіна-Жарова Тетяна Іванівна

доктор технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9623-8771> **e-mail:** t.pruman@gmail.com

УДК 502.51:504.5:004.8

Taras Trysnyuk¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com

Vladyslav Vasylenko¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

Viacheslav Okhariev¹, Candidate of Technical Science, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> **e-mail:** okhariev.vo@gmail.com

Iryna Borodkina² Candidate of Technical Sciences, Associate professor of Computer Science department

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3667-3728> **e-mail:** i.borodkina@nubip.edu.ua

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²National University of Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

REMOTE RESEARCH METHODS FOR ASSESSING THE IMPACT OF RUSSIA'S ARMED AGGRESSION ON THE ECOLOGICAL SECURITY OF NATURAL RESERVED AREAS

***Abstract.** The article is devoted to solving a pressing scientific and practical problem, which consists in developing and implementing information technology for remote and geoinformation monitoring of nature reserves in Ukraine in conditions of military operations. The research is aimed at increasing the reliability of assessing environmental losses, detecting mechanical damage to landscapes, temperature anomalies, fire centers, hydrological disturbances and structural changes in the earth's surface. The work uses optical and radar satellite data, index analysis, multi-temporal composites, digital terrain models and machine learning algorithms. The proposed conceptual model of an integrated system allows for spatio-temporal analysis, generating analytical maps and supporting decision-making on the preservation and post-war restoration of natural ecosystems. The results obtained confirm the significant scale of degradation of protected areas and the need for systematic satellite monitoring as a tool for the evidence base of environmental losses. The work uses a set of satellite data of different spatial and spectral resolutions. Optical images of Sentinel-2, Landsat-8/9, PlanetScope and WorldView allowed to perform an analysis of vegetation cover, to detect traces of mechanical damage and burns. Radar data of Sentinel-1 and ICEYE provided monitoring regardless of weather conditions.*

The mathematical apparatus of the study involves the use of classification algorithms of machine learning for automated selection of damaged areas. Spatio-temporal dynamics were analyzed by comparing multi-temporal composites.

Keywords: information technologies, remote sensing of the Earth, geographic information systems, nature reserves, military operations, environmental security, satellite monitoring, automated system, modeling accuracy, post-war recovery, communication channels.

Т.В. Триснюк¹, В.М. Василенко¹, В.О. Охарєв¹, І.Л. Бородкіна²

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ДИСТАНЦІЙНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ЗБРОЙНОЇ АГРЕСІЇ РОСІЇ НА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНИХ ТЕРИТОРІЙ

***Анотація.** Стаття присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання, що полягає у розробленні та впровадженні інформаційної технології дистанційного та геоінформаційного моніторингу природно-заповідних територій України в умовах воєнних дій. Дослідження спрямоване на підвищення достовірності оцінювання екологічних втрат, виявлення механічних руйнувань ландшафтів, температурних аномалій, пожежних осередків, гідрологічних порушень та структурних змін земної поверхні. У роботі використано оптичні та радіолокаційні супутникові дані, індексний аналіз, багаточасові композити, цифрові моделі рельєфу та алгоритми машинного навчання. Запропонована концептуальна модель інтегрованої системи дозволяє здійснювати просторово-часовий аналіз, формувати аналітичні карти та підтримувати прийняття рішень щодо збереження й післявоєнного відновлення природних екосистем. Отримані результати підтверджують значний масштаб деградації заповідних територій та необхідність системного супутникового моніторингу як інструменту доказової бази екологічних втрат. У роботі використано комплекс супутникових даних різної просторової та спектральної роздільної здатності. Оптичні знімки Sentinel-2, Landsat-8/9, PlanetScope та WorldView дозволили виконати аналіз рослинного покриву, виявити сліди механічних руйнувань та згаріщ. Радіолокаційні дані Sentinel-1 та ICEYE забезпечили моніторинг незалежно від погодних умов.*

Математичний апарат дослідження передбачає використання класифікаційних алгоритмів машинного навчання для автоматизованого виділення пошкоджених ділянок. Просторово-часова динаміка аналізувалася шляхом порівняння багаточасових композитів.

***Ключові слова:** інформаційні технології, дистанційне зондування Землі, геоінформаційні системи, природно-заповідні території, воєнні дії, екологічна безпека, супутниковий моніторинг, автоматизована система, точність моделювання, повоєнне відновлення, канали зв'язку.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.171-178>

Вступ

Повномасштабна збройна агресія російської федерації проти України спричинила безпрецедентний негативний вплив на природно-заповідний фонд держави. Значна частина заповідників і національних природних парків опинилася в зоні активних бойових дій або тимчасової окупації, що унеможливило проведення традиційного наземного екологічного контролю. У таких умовах особливого значення набувають дистанційні методи дослідження, які забезпечують оперативне отримання об'єктивної інформації про стан територій незалежно від доступності місцевості.

Природно-заповідні території є ключовими елементами екологічної мережі України, виконують функції збереження біорізноманіття, підтримання гідрологічного режиму, стабілізації кліматичних процесів та забезпечення екосистемних послуг. Їх пошкодження має довготривалі наслідки не лише для локальних екосистем, а й для регіональної екологічної безпеки.

В умовах воєнних дій виникла необхідність створення інтегрованої інформаційної системи, здатної поєднувати супутникові спостереження, геоінформаційний аналіз та алгоритми штучного інтелекту для комплексної оцінки масштабів деградації природних територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Світовий та вітчизняний досвід підтверджує високу ефективність застосування супутникових технологій для моніторингу екологічних катастроф, техногенних аварій, масштабних пожеж, повеней, гідрологічних порушень та наслідків воєнних конфліктів. Активний розвиток космічних програм Sentinel, Landsat, WorldView, PlanetScope, а також радіолокаційних платформ Sentinel-1, ICEYE, Capella суттєво розширив можливості оперативного аналізу змін земної поверхні, особливо в умовах обмеженого доступу до територій, що зазнали руйнувань.

Комплексні геоінформаційні дослідження водних екосистем України, виконані під керівництвом О.М. Трофимчука та за участю В.М. Триснюка, Є.С. Анпілової, О.С. Бутенка, В.Ю. Вишнякова, сформуvalи сучасну концепцію просторово-часового моніторингу водних систем із застосуванням геоінформаційних моделей і прогнозних сценаріїв. У цих роботах підкреслюється значення багатопарової інтеграції даних для оцінювання екологічної безпеки територій [2-4, 7].

Методологічні засади сучасного дистанційного моніторингу природних процесів та катастрофічних явищ були сформовані у працях українських і зарубіжних дослідників. Значний внесок у розвиток екологічного моніторингу річкових долин та територій із катастрофічними паводками зроблено О.М. Адаменком та Д.О. Зоріним, які у рамках досліджень Дністровського протипаводкового полігону обґрунтували необхідність комплексного використання геоінформаційних технологій і даних дистанційного зондування для оцінки екологічного стану територій у кризових умовах [1, 5].

Значний внесок у розвиток космічного моніторингу безпеки водних систем зробив Г.Я. Красовський, який обґрунтував використання геоінформаційних технологій для оцінки стану водних об'єктів та їх захисту від техногенного впливу. Його дослідження заклали основу для впровадження комплексних систем екологічного моніторингу на державному рівні [8].

Сучасні підходи до обробки супутникових даних передбачають використання спектральних індексів для оцінювання стану рослинності, вологості ґрунтів і поверхневих вод, аналіз текстурних характеристик зображень, багаточасове порівняння сцен, а також застосування алгоритмів машинного навчання, зокрема Random Forest, Support Vector Machine та глибоких нейронних мереж типу U-Net. Дослідження у сфері оцінювання достовірності інформації в умовах невизначеності, виконані С. Зайцевим, В. Василенком, В. Триснюком та Т. Триснюком, розширили можливості адаптивного аналізу великих масивів даних у складних інформаційних середовищах, що є особливо актуальним для моніторингу територій у зоні бойових дій [6].

Таким чином, накопичений науковий доробок у галузі дистанційного зондування Землі, геоінформаційного моделювання та аналізу екологічних ризиків створює міцну теоретико-методологічну основу для дослідження впливу збройної агресії на природно-заповідні території. Водночас специфіка воєнних впливів вимагає подальшої адаптації існуючих методик до умов неповноти даних, складних атмосферних явищ, наявності димових завіс, руйнування інфраструктури та високої динаміки просторових змін. Саме ці обставини обумовлюють необхідність розроблення інтегрованих інформаційних технологій, що поєднують дистанційний моніторинг, геоінформаційний аналіз і системи підтримки прийняття рішень для забезпечення екологічної безпеки держави в умовах воєнних викликів.

Метою роботи є розроблення науково-методичних засад і програмно-аналітичного інструментарію для оцінки впливу збройної агресії на екологічну безпеку природно-заповідних територій із застосуванням дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- здійснити просторово-часовий аналіз температурних аномалій;
- виявити механічні руйнування ландшафтів та інженерні фортифікації;
- оцінити зміни земельного покриву;
- побудувати інтегровану ГИС-модель воєнних екозмін;
- сформувати доказову картографічну базу екологічних втрат.

Об'єктом дослідження є процес інформаційних технологій для оцінки впливу збройної агресії на екологічну безпеку природно-заповідних територій.

Виклад основного матеріалу дослідження

Розроблення інформаційної технології дистанційного оцінювання впливу збройної агресії на екологічну безпеку природно-заповідних територій ґрунтується на системному підході до аналізу довкілля як складної багаторівневої природно-антропогенної системи, що функціонує у просторі та часі. У межах запропонованої концепції природно-заповідна територія розглядається як динамічний об'єкт спостереження, стан якого визначається сукупністю біофізичних, гідрологічних, ландшафтних та біотичних характеристик, що перебувають у взаємозв'язку та взаємозалежності.

У довоєнний період така система функціонує у відносно стабільному режимі, що характеризується сезонною циклічністю, природними флуктуаціями та адаптивними механізмами саморегуляції. Збройна агресія виступає потужним зовнішнім деструктивним фактором, який порушує усталені екологічні зв'язки, трансформує структуру ландшафтів та спричиняє незворотні зміни у функціонуванні екосистем. Бойові дії, артилерійські обстріли, мінування, переміщення важкої техніки, створення фортифікаційних споруд, руйнування гідротехнічних об'єктів та пожежі формують комплексний вплив, що має як прямі, так і опосередковані наслідки [2, 3].

У зв'язку з цим виникає необхідність формування інформаційної моделі території, яка дозволяє відобразити її стан до початку воєнних дій, у процесі активної фази конфлікту та на етапі післявоєнної трансформації. Така модель будується на основі інтеграції багатоспектральних супутникових зображень, радіолокаційних даних, цифрових моделей рельєфу, картографічних матеріалів та статистичних показників.

На першому етапі здійснюється формування базового екологічного профілю території, який відображає природні межі ландшафтів, структуру рослинного покриву, гідрографічну мережу, типи ґрунтів та просторовий розподіл біотопів. Цей профіль є еталонним станом, з яким порівнюються подальші зміни. Базовий стан визначається шляхом аналізу архівних супутникових даних за декілька років до початку активної фази бойових дій, що дозволяє врахувати природну міжрічну мінливість.

Другий етап передбачає фіксацію та локалізацію воєнно зумовлених змін. Для цього застосовується багаточасовий аналіз знімків, який дозволяє ідентифікувати ділянки, що зазнали деградації. Зміни рослинного покриву проявляються у зменшенні щільності біомаси, зміні спектральних характеристик або повному знищенні рослинності. Такі ділянки чітко виділяються на багатоспектральних зображеннях та можуть бути класифіковані як зони пожеж або механічних руйнувань.

Механічні пошкодження ландшафту мають специфічні морфологічні ознаки, пов'язані з порушенням мікрорельєфу та структури ґрунтового покриву. Створення окопів, траншей, укриттів для техніки та інших інженерних споруд формує характерні лінійні та полігональні структури, що добре ідентифікуються на знімках високої роздільної здатності. Пересування важкої техніки спричиняє ущільнення ґрунту та появу слідів, які зберігаються тривалий час і впливають на подальше відновлення рослинності.

Пожежна активність аналізується через просторову концентрацію термічних аномалій та зміну кольорових характеристик поверхні. У воєнний період кількість пожеж значно перевищує довоєнні показники, що свідчить про їх антропогенне походження. Масові пожежі призводять до втрати біорізноманіття, руйнування місць гніздування птахів, знищення рідкісних рослинних угруповань та змін у трофічних ланцюгах.

Особливе значення має аналіз гідрологічних змін, оскільки руйнування гідротехнічних споруд та порушення водообміну впливають на великі території. Підтоплення прибережних зон, зміна солоності води та надходження забруднюючих речовин формують вторинні екологічні ефекти. Дистанційні методи дозволяють оцінити зміну площ водного дзеркала, визначити зони підтоплення та встановити напрямки трансформації водно-болотних екосистем.

Важливою складовою є просторово-часова агрегація отриманих даних. Кожна територіальна одиниця отримує комплексну характеристику ступеня пошкодження, яка враховує інтенсивність пожеж, площу механічних руйнувань, зміну рослинності та гідрологічні трансформації. Такий підхід дозволяє сформуванню карти екологічного ризику та виділити пріоритетні зони для відновлювальних заходів.

Для забезпечення достовірності аналізу використовується перехресна перевірка різних джерел інформації. Дані оптичних сенсорів зіставляються з радіолокаційними, що дозволяє зменшити вплив атмосферних умов та хмарності. Багаточасові композити дозволяють врахувати сезонну мінливість та виключити природні фактори, не пов'язані з воєнними діями [6].

Інтелектуальні алгоритми класифікації автоматизують процес обробки великих масивів даних. Моделі машинного навчання навчаються на вибірках, сформованих експертним шляхом, і надалі застосовуються до всієї території дослідження. Це дозволяє забезпечити оперативність отримання результатів та мінімізувати суб'єктивний фактор.

Особливу увагу приділено формуванню інтегрованої геоінформаційної бази, яка акумулює всі результати аналізу. База даних містить шари пошкоджень різного типу, що можуть бути комбіновані для проведення комплексного аналізу. Кожен шар має атрибутивну інформацію щодо дати фіксації, площі пошкодження та типу впливу.

Висновки

У результаті виконаного дослідження сформовано науково обгрунтовану концепцію дистанційної оцінки впливу збройної агресії на екологічну безпеку природно-заповідних територій України, що базується на інтеграції багатоспектральних оптичних, радіолокаційних та термічних супутникових даних з геоінформаційними методами аналізу просторово-часових змін. Запропонований підхід дозволяє розглядати природно-заповідні території як складні динамічні системи, стан яких трансформується під впливом воєнних дій, і забезпечує кількісне та якісне оцінювання масштабів цієї трансформації.

Застосування багаточасових супутникових композитів дозволило відокремити природну сезонну мінливість від антропогенних змін та встановити причинно-наслідкові зв'язки між військовою активністю і деградацією екосистем.

У процесі дослідження підтверджено, що воєнні дії призводять до значного зростання фрагментації природних ландшафтів, зниження продуктивності екосистем, порушення структури біотопів та втрати біорізноманіття. Особливо вразливими виявилися прибережні та водно-болотні екосистеми, де поєднання механічних руйнувань і гідрологічних трансформацій формує довготривалі негативні наслідки. Отримані результати свідчать про те, що масштаб екологічних змін має системний характер і виходить за межі локальних пошкоджень, впливаючи на регіональні природні комплекси.

Інтеграція супутникових даних різної фізичної природи забезпечила підвищення достовірності оцінювання стану довкілля. Наукова новизна дослідження полягає у створенні інтегрованої інформаційної моделі воєнно зумовлених екологічних змін, що поєднує багатоспектральний аналіз, просторово-часове моделювання та елементи систем підтримки прийняття рішень. Запропонована модель дозволяє не лише фіксувати факт пошкодження, але й оцінювати інтенсивність, просторові межі та потенційні довгострокові наслідки деградації природних комплексів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості формування доказової бази екологічних збитків, підготовки аналітичних карт для органів державної влади та природоохоронних установ, а також розроблення рекомендацій щодо післявоєнного відновлення екосистем. Інтеграція результатів дистанційного моніторингу до систем підтримки прийняття рішень створює передумови для впровадження багатокритеріального аналізу ризиків, прогнозування сценаріїв відновлення та оптимізації управлінських рішень.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням алгоритмів автоматичного розпізнавання пошкоджень, розширенням спектра використаних супутникових сенсорів, залученням безпілотних літальних апаратів для високоточного локального обстеження та розробленням економічних моделей оцінки екологічних збитків. Розвиток інтегрованих інформаційних систем екологічного моніторингу є важливою складовою забезпечення екологічної безпеки держави в умовах сучасних викликів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Адаменко, О. М., & Зорін, Д. О. (2018). *Стан довкілля у річкових долинах з катастрофічними паводками. Перший етап екологічних досліджень на Дністровському протипаводковому полігоні (2012–2018 рр.)*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ.
2. Trysnyuk, T., Trysnyuk, V., Okhariev, V., Shumeiko, A., & Nikitin, A. (2018). Cartographic model of Dniester river basic probable flooding. *Series D: Geology and Environmental Engineering*, 32(1), 51–55. <https://doi.org/10.37193/SBSD.2018.1.07> https://www.researchgate.net/publication/352110103_cartographic_models_of_dniester_river_basin_probable_flooding
3. Трофимчук, О. М., Триснюк, В. М., Анпілова, Є. С., Бутенко, О. С., Вишняков, В. Ю., Загородня, С. А., Клименко, В. І., Красовська, І. Г., Крета, Д. Л., Миронцов, М. Л., Охарев, В. О., Попова, М. А., Радчук, І. В., Триснюк, Т. В., Шевякіна, Н. А., & Шумейко, В. О. (2022). *Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування*. Івано-Франківськ: Супрун В. П.
4. Адаменко, О. М., & Зоріна, Н. О. (2015). *Методологія та організація наукових досліджень в екології*. Івано-Франківськ: Супрун В. П.
5. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Nikitin, A., Kurylo, A., & Demydenko, O. (2021). Geomodels of space monitoring of water bodies. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 280, 09016). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009016> https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/56/e3sconf_icsf2021_09016.pdf
6. Zaitsev, S., Vasylenko, V., Trysnyuk, V., & Trysnyuk, T. (2023). Adaptive method for assessing information reliability under uncertainty for 5G and IoT systems. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems*, November 22–24, 2023, Ternopil, Ukraine. <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper2.pdf>
7. Анпілова, Є. С., Волошкіна, О. С., & Трофимчук, О. М. (2008). ГІС/ДЗЗ технології при веденні моніторингу в басейні прикордонної р. Сіверський Донецьк. *Екологічна безпека та природокористування*, 2, 170–177.
8. Красовський, Г. Я. (2008). *Космічний моніторинг безпеки водних систем з застосуванням геоінформаційних технологій*. Київ: Інтертехнологія.

Стаття надійшла до редакції 06.01.26, надійшла після рецензування 06.02.26, прийнята 02.03.26

REFERENCES

1. Adamenko, O. M., & Zorin, D. O. (2018). *Stan dovkillia u richkovykh dolynakh z katastrofichnymu pavodkamy. Pershyi etap ekolohichnykh doslidzhen na Dnistrovskomu protypavodkovomu polihoni (2012–2018 rr.)* [Environmental conditions in river valleys with catastrophic floods. The first stage of environmental research at the Dniester anti-flood testing site (2012–2018)]. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG. [in Ukrainian]
2. Trysnyuk, T., Trysnyuk, V., Okhariev, V., Shumeiko, A., & Nikitin, A. (2018). Cartographic model of Dniester river basic probable flooding. *Series D: Geology and Environmental Engineering*, 32(1), 51–55. <https://doi.org/10.37193/SBSD.2018.1.07> https://www.researchgate.net/publication/352110103_cartographic_models_of_dniester_river_basin_probable_flooding
3. Trofymchuk, O. M., Trysnyuk, V. M., Anpilova, Ye. S., Butenko, O. S., Vyshniakov, V. Yu., Zahorodnia, S. A., Klymenko, V. I., Krasovska, I. H., Kreta, D. L., Myrontsov, M. L., Okhariev, V. O., Popova, M. A., Radchuk, I. V., Trysnyuk, T. V., Sheviakina, N. A., & Shumeiko, V. O. (2022). *Heoinformatsiini doslidzhennia vodnykh ekosystem Ukrainy: monitorynh ta prohnozuvannia* [Geoinformation studies of water ecosystems of Ukraine: Monitoring and forecasting]. Ivano-Frankivsk: Suprun V. P. [in Ukrainian]

4. Adamenko, O. M., & Zorina, N. O. (2015). *Metodolohiia ta orhanizatsiia naukovykh doslidzhen v ekolohii* [Methodology and organization of scientific research in ecology]. Ivano-Frankivsk: Suprun V. P. [in Ukrainian]
5. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Nikitin, A., Kurylo, A., & Demydenko, O. (2021). Geomodels of space monitoring of water bodies. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 280, 09016). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009016>
https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/56/e3sconf_icsf2021_09016.pdf
6. Zaitsev, S., Vasylenko, V., Trysnyuk, V., & Trysnyuk, T. (2023). Adaptive method for assessing information reliability under uncertainty for 5G and IoT systems. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems*, November 22–24, 2023, Ternopil, Ukraine. <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper2.pdf>
7. Anpilova, Ye. S., Voloshkina, O. S., & Trofymchuk, O. M. (2008). GIS/RS technologies for monitoring in the basin of the transboundary Siverskyi Donets River. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 2, 170–177. [in Ukrainian]
8. Krasovskyi, H. Ya. (2008). *Kosmichniy monitorynh bezpeky vodnykh system z zastosuvanniam heoinformatsiinykh tekhnolohii* [Space monitoring of water system safety using geoinformation technologies]. Kyiv: Intertekhnolohiia. [in Ukrainian]

The article was received 06.01.26, received after revision 06.02.26, accepted 02.03.26

Триснюк Тарас Васильович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу прикладної інформатики Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com

Василенко Владислав Михайлович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу інформаційних та комунікаційних технологій Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

Охарєв Вячеслав Олександрович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу природних ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

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

Бородкіна Ірина Лаврентіївна

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, факультет інформаційних технологій, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3667-3728> **e-mail:** i.borodkina@nubip.edu.ua

UDC 550.34:620.179

Vasyl Mostovyy¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1759-1893> **e-mail:** vasyl.mostovyy@gmail.com

Anton Korobenko², PhD Student
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-7099-6535> **e-mail:** anton.korobenko.off@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space NASU, Kyiv, Ukraine

²Taras Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine

ASSESSMENT OF THE DYNAMIC PARAMETERS OF COLUMN-TYPE BUILDING STRUCTURES UNDER SEISMOACOUSTIC MONITORING

Abstract. *The paper considers an approach to assessing the dynamic parameters of column-type building structures under passive seismoacoustic monitoring. To describe the response of the object, a mathematical model in the form of a superposition of damped oscillators is proposed, and its parameters are determined by minimizing the agreement criterion between the model and the experimental data. Spectral analysis, the Levenberg–Marquardt method, and Monte Carlo trials are used to obtain the optimal solution. It is shown that the free parameters of the model, in particular the damping characteristics, are informative for identifying the technical state of the object and can be used for long-term monitoring. The results indicate that, at the time of observation, the object was in a stable stationary state.*

Keywords: *passive seismoacoustic monitoring, superposition of damped oscillators, nonlinear optimization, Levenberg–Marquardt method, damping characteristics.*

В.С. Мостовий¹, А.П. Коробенко²

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, м. Київ, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ КОЛОННОГО ТИПУ В УМОВАХ СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Анотація. *У статті розглянуто підхід до оцінювання динамічних параметрів будівельних конструкцій колонного типу в умовах пасивного сейсмоакустичного моніторингу. Для опису реакції об'єкта запропоновано математичну модель у вигляді суперпозиції затухаючих осциляторів, параметри якої визначаються шляхом мінімізації критерію узгодження між моделлю та експериментальними даними. Для пошуку оптимального розв'язку використано спектральний аналіз, метод Левенберга–Марквардта та випробування Монте–Карло. Показано, що вільні параметри моделі, зокрема демпфувальні характеристики, є інформативними для ідентифікації технічного стану об'єкта та можуть бути використані для довготривалого моніторингу. Результати дослідження засвідчили, що на момент спостережень об'єкт перебував у стійкому стаціонарному стані.*

Ключові слова: *пасивний сейсмоакустичний моніторинг, старіння матеріалу, вільні параметри моделі, нелінійна оптимізація, метод Левенберга–Марквардта, спектральний аналіз, демпфування.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.179-189>

© В.С. Мостовий, А.П. Коробенко, 2026

Вступ

Практичний досвід, накопичений авторами під час моніторингу низки промислових споруд, дає підстави стверджувати, що процес старіння конструкцій можна описати через певний простір ознак, який формується сукупністю параметрів, пов'язаних з пружними властивостями матеріалів досліджуваних об'єктів. Оскільки швидкість поширення, а також форма поздовжніх і поперечних хвиль у матеріалі визначаються його пружними характеристиками, зокрема модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона, зміна цих величин неминуче відбивається і на спектральних параметрах сигналів емісії, що виникають у матеріалі в процесі його старіння.

Власні частоти досліджених конструкцій перебували в сейсмічному діапазоні. Для об'єкта, який перебуває у стаціонарному стані, у режимі пасивного моніторингу спостерігалось стійке переміщення вектору стану в просторі ознак у межах відносно невеликого еліпсоїда обертання. Це пояснюється стохастичною природою самого процесу спостереження. Подібний характер поведінки зберігається доти, доки в матеріалі не починають розвиватися явища втоми. З позицій матеріалознавства втома розглядається як поступове накопичення локальних структурних пошкоджень, що виникають під дією циклічних навантажень. При цьому максимальні напруження в циклі залишаються нижчими як за граничне напруження, так і за межу міцності відповідного матеріалу.

Руйнування матеріалу як елемента конструкції полягає у втраті ним несучої здатності, а в граничному випадку – у втраті працездатності всієї конструкції. Такий процес починається тоді, коли напруження наближаються до критичних значень і спричиняють надмірні деформації, за яких матеріал після завершення циклу навантаження вже не повертається до початкового стану. Саме в цьому разі проявляється гістерезис. Будь-який перерозподіл енергії всередині матеріалу супроводжується появою сигналів емісії. Такі сигнали являють собою хвилі напружень, що виникають унаслідок раптової внутрішньої перебудови напруженого стану матеріалу, спричиненої змінами його мікроструктури.

Причинами таких внутрішніх змін можуть бути зародження та розвиток тріщин, фазові перетворення в суцільних матеріалах, а також послаблення зв'язків між складовими елементами структури. Зміна параметрів емісійних сигналів у часі відображає трансформацію пружних властивостей досліджуваного об'єкта. Це означає, що динаміка характеристик емісії пов'язана з динамічними властивостями самої конструкції. Однак через наявність стохастичного фоновому шуму під час моніторингу цю залежність доцільно розглядати як статистичну. У зв'язку з цим одним із ключових завдань є визначення найбільш інформативних параметрів для формування простору ознак, у межах якого можна аналізувати їхню поведінку в динаміці та на цій основі будувати вирішальне правило для прогнозування технічного стану об'єкта [1].

Таким чином постає проблема адекватного вибору простору ознак, що відображає старіння та втому конструкції. Оскільки фактична інформація про стан об'єкта доступна лише опосередковано – через характеристики зареєстрованих сигналів емісії, – оцінювання також має непрямий характер і базується на аналізі поширення хвиль емісії. Динамічні зміни цих хвиль проявляються через зміни їхніх спектральних параметрів. Відповідно, простір

спектральних характеристик формується на основі параметрів, статистично пов'язаних зі станом самого об'єкта. Стохастичні властивості такого складного випадкового процесу і відображають зміну пружних характеристик матеріалу. Тому задача оцінювання параметрів цього процесу фактично зводиться до визначення їхніх апостеріорних імовірностей, динаміка яких дає змогу судити про розвиток втоми та старіння конструкції.

Під пасивним сейсмоакустичним моніторингом будівельних об'єктів розуміють систематичне спостереження за параметрами природного фону досліджуваної конструкції. Такий природний фон є суперпозицією сигналів емісії, що виникають як унаслідок внутрішніх змін самого об'єкта, наприклад утворення мікротріщин, так і внаслідок його реакції на зовнішні збурення. До таких збурень належать вітрові навантаження, транспортні впливи, сейсмічні події, коливання ґрунту, а також вібрації, породжені іншими об'єктами різної природи, які також реагують на зовнішні чинники.

Отже, математична модель старіння конструкції повинна враховувати як характер зовнішніх впливів, так і специфіку реакції самого об'єкта на ці впливи. В основу запропонованого підходу покладено гіпотезу, згідно з якою будь-яке зовнішнє збурення формує реакцію конструкції у вигляді суперпозиції осциляторів, частина яких виникає в межах інтервалу спостереження, а частина – ще до його початку. Саме режимне відстеження динаміки параметрів цієї сукупності осциляторів і становить сутність пасивного сейсмоакустичного моніторингу, спрямованого на оцінювання ступеня старіння досліджуваного об'єкта.

Математична модель

Як динамічну модель досліджуваного об'єкта розглядаємо суперпозицію з $I + 1$ осциляторів, кожен з яких починає діяти у власний момент часу t_{0+i} , характеризується певною амплітудою l_{1+i} , параметром затухання коливань з постійною часу l_{2+i} і власною кутовою частотою l_{3+i} , $i = \overline{0, I}$ [2].

$$M(t, \lambda) = \sum_{i=0}^I \Phi(t - \lambda_{i.S+0}) \lambda_{i.S+1} [e^{-\lambda_{i.S+2}(t - \lambda_{i.S+0})} \sin[\lambda_{i.S+3}(t - \lambda_{i.S+0})]] \quad (1)$$

де λ – вектор вільних параметрів моделі, S – кількість вільних параметрів підмоделі, $I + 1$ – кількість підмоделей, які беруть участь в суперпозиції, $\Phi(t)$ – одинична функція Хевісайда. Кожна з підмоделей – це фізично здійсненна хвиля [3]. Як видно з (1), лише параметри l_i , *when* $\text{mod}(i, 4) = 1$ входять до моделі лінійно, тоді як решта параметрів мають нелінійний характер.

Оптимальне оцінювання параметрів сигналу полягає у визначенні такого вектору вільних параметрів моделі, за якого досягається найкраще узгодження між модельним описом і експериментально спостережуваними даними. У роботі розглянуто відносно простий випадок, коли мірою такої узгодженості обрано квадрат відхилення моделі від оброблених даних $y(t)$ у метриці L_2 . За цих умов критерій $F(\lambda)$ задається співвідношенням:

$$F(\lambda) = \int_T [y(t) - M(t, \lambda)]^2 dt, \quad (2)$$

а оптимальна оцінка вільних параметрів λ^* визначається як точка, яка мінімізує (2) в просторі параметрів [4]:

$$F(\boldsymbol{\lambda}^*) = \min_{\boldsymbol{\lambda} \in \Lambda} F(\boldsymbol{\lambda})$$

$y(t)$ – аналітична апроксимація вектору значень оброблених спостережуваних даних, Λ - множина можливих значень вектору $\boldsymbol{\lambda}$.

Для знаходження мінімуму критерію необхідно обчислити частинні похідні $\frac{\partial F(\boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_k}$, $k = \overline{0, K}$, тут $K+1$ – кількість всіх вільних параметрів моделі. Прирівнявши $\frac{\partial F(\boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_k}$, $k = \overline{0, K}$ до нуля, отримаємо систему рівнянь, що має такий вигляд:

$$\frac{\partial F(\boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_k} = \int_T [y(t) - M(t, \boldsymbol{\lambda})] \frac{\partial M(t, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_k} dt = 0 \quad k = \overline{0, K}. \quad (3)$$

Система рівнянь зводиться до

$$\int_T [y(t) \cdot \mathbf{D}(M(t, \boldsymbol{\lambda}))] dt = \int_T [M(t, \boldsymbol{\lambda}) \cdot \mathbf{D}(M(t, \boldsymbol{\lambda}))] dt. \quad (4)$$

Тут $\mathbf{D}(M(t, \boldsymbol{\lambda}))$ – вектор функція, сформований з похідних моделі по всіх компонентах вектору $\boldsymbol{\lambda}$. Для моделі (1) цей вектор має вигляд:

$$\mathbf{D}(M(t, \boldsymbol{\lambda})) = \frac{\partial M(t, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_{s+i}}; \quad s = \overline{0, S}; \quad i = \overline{0, I}, \quad (5)$$

i – порядковий номер підмоделі в (1).

Для подальших обчислень доцільно подавати вектор вільних параметрів $\boldsymbol{\lambda}$.

Оптимальну оцінку матриці вільних параметрів Λ визначають як таку оцінку, що забезпечує найменше значення критерію серед усіх локальних мінімумів. Кожний локальний мінімум знаходять як найближчий до випадково обраної точки у просторі параметрів, яка задається псевдовипадковим вектором відповідної розмірності. Практично процедура побудована так: для множини з M псевдовипадкових матриць Λ обчислюють найближчі локальні екстремуми, після чого серед усіх знайдених локальних мінімумів обирають глобальний. Саме точка, що забезпечує найменше значення критерію у $S \times I$ вимірному просторі параметрів, і приймається як оптимальна оцінка вільних параметрів моделі сигналу. Застосування такої процедури дає змогу забезпечити збіжність до оптимального розв'язку за ймовірністю зі збільшенням кількості випробувань, тобто зі зростанням числа використаних псевдовипадкових матриць параметрів Λ [5].

Прикладне та програмне забезпечення дослідження

Під час проведення дослідження як чутливі елементи системи реєстрації та обробки даних було використано трикомпонентний велосиметр, який складається з трьох взаємно перпендикулярних сенсорів із вузькою діаграмою спрямованості. Один із напрямів орієнтовано вертикально. Попередній аналіз результатів вимірювань показав, що в цьому напрямі рівень коливань є приблизно на порядок меншим, ніж у горизонтальній площині, тому в подальших розрахунках вертикальну складову не враховували. Спектральна характеристика горизонтально орієнтованих датчиків приладу має двомодальний вигляд із максимумами поблизу 0.7 Гц і 13 Гц.

Апаратна частина системи спостереження побудована як послідовне з'єднання кількох функціональних блоків: сенсорів, каналу передавання сигналу, аналого-цифрового перетворювача та комп'ютера.

Досліджуваний об'єкт є інженерною спорудою, пов'язаною з великою кількістю пристроїв, що працюють на промисловій частоті. Через це фонові завади на цій частоті та на пов'язаних із нею гармоніках істотно перевищують рівень сигналів, зареєстрованих на власних частотах конструкції. Саме тому отримані експериментальні дані потребували ґрунтовної попередньої обробки.

У нашому випадку процес вимірювання до моменту надходження даних у комп'ютер можна подати у вигляді системи, що описується суперпозицією згорток сигналу $S(t)$, $h_1(t)$ – передатної функції прибору (для кожного з приборів вона індивідуальна), $h_2(t)$ – передатної функції каналів зв'язку, $h_3(t)$ – передатної функції аналогово-цифрового перетворювача [6]. В цій системі $S(t)$ – сигнал, який поступає в систему, $\tilde{S}(t)$ – перетворений системою сигнал. В лінійному приближенні математична модель вимірювання представляється у вигляді:

$$\tilde{S}(t) = S(t) * h_1(t) * h_2(t) * h_3(t) + n(t) = S(t) * H(t) + n(t), \quad (6)$$

де $n(t)$ – випадкова сумарна погрішність від збурень, що виникають у кожному елементі системи, а $H(t)$ – передатна функція системи вимірювання в цілому. Символ $*$ – це оператор згортки. Статистичний аналіз перешкод дає змогу припустити, що $n(t)$ можна моделювати білим шумом. Математична обробка зводиться до побудови оператора $H^{-1}(t)$, зворотного до оператора системи $H(t)$ та корекції сигналів їхньою згорткою з оператором $H^{-1}(t)$.

$$H(t) * H^{-1}(t) = \delta(t). \quad (7)$$

В цьому випадку модель системи вимірювань приймає вигляд:

$$\tilde{S}(t) = [S(t) * H(t) * n(t)] * H^{-1}(t) = S(t) + n(t) * H^{-1}(t). \quad (8)$$

З останнього виразу видно, що дія коригувального оператора, хоча й забезпечує відновлення сигналу, водночас може погіршувати співвідношення сигнал-перешкода.

Моніторинг будівельної конструкції колонного типу

Запропонований підхід було застосовано під час моніторингу будівельної конструкції колонного типу. Метою дослідження було відстеження динаміки вектору вільних параметрів моделі об'єкта в обраному просторі ознак, які описують поточний стан досліджуваної конструкції. Якщо спостерігаються істотні зміни цих параметрів, це може свідчити про наявність структурних перетворень в об'єкті.

Під істотною зміною слід розуміти вихід вектору вільних параметрів за межі області стаціонарності, яка в просторі ознак старіння моделі об'єкта задається певною обмежувальною поверхнею, наприклад еліпсоїдом обертання фіксованого об'єму ε . Така область стаціонарності є

індивідуальною для кожної конкретної конструкції й визначається дослідником з урахуванням умов проведення спостережень та особливостей самого об'єкта.

Як параметричний простір ознак старіння досліджуваного об'єкта доцільно використовувати простір вільних параметрів раніше запропонованої моделі, у якій об'єкт подано у вигляді суперпозиції осциляторів.

На рисунку 1 наведено аналітичну кусково-лінійну апроксимацію вектору значень попередньо оброблених експериментальних даних для однієї з горизонтальних компонент, зареєстрованих на димовій трубі.

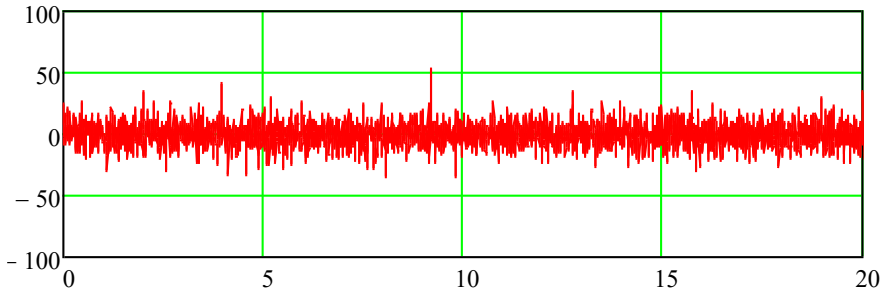


Рис. 1. Фрагмент тривалістю 20 с даних спостереження об'єкта клонового типу. На осі абсцис подано час у секундах, на осі ординат – амплітуди швидкості зареєстрованого сигналу у відносних одиницях

Подані на рисунку 1 дані попередньо пройшли обробку, зокрема було виконано фільтрацію зареєстрованих сигналів з урахуванням особливостей фоновому шуму [7].

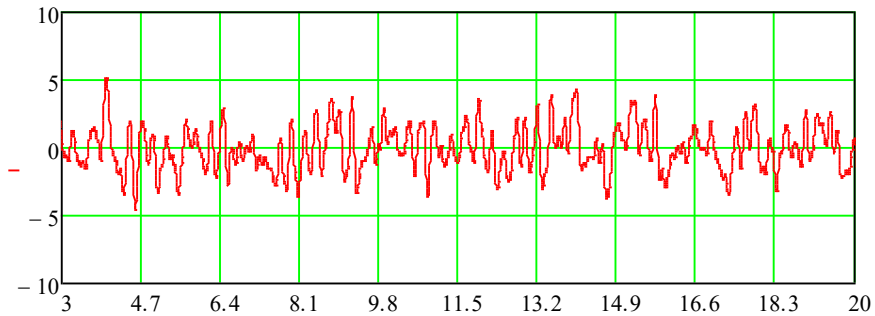


Рис. 2. Фрагмент тривалістю 20 с відфільтрованих даних спостереження об'єкта клонового типу. На осі абсцис подано час у секундах, на осі ординат – амплітуди швидкості зареєстрованого сигналу у відносних одиницях

На рисунку 3 наведено фрагмент Фур'є спектра на інтервалі $[0,10 \text{ Hz}]$ з інтервалу $[0,50 \text{ Hz}]$ аналітичної апроксимації вектору значень попередньо оброблених експериментальних даних. По осі абсцис подано частоту в герцах, а по осі ординат – модуль спектра у відносних одиницях.

Оцінки добротності власних частот, а також співвідношень між амплітудами власних частот, отримані на основі перетворення Фур'є, дають змогу визначити початкову точку в просторі ознак для подальшого пошуку

мінімуму критерію методом Левенберга–Марквардта [8] у межах серії випробувань Монте–Карло. Глобальний мінімум у цьому випадку відповідає оптимальному розв’язку задачі.

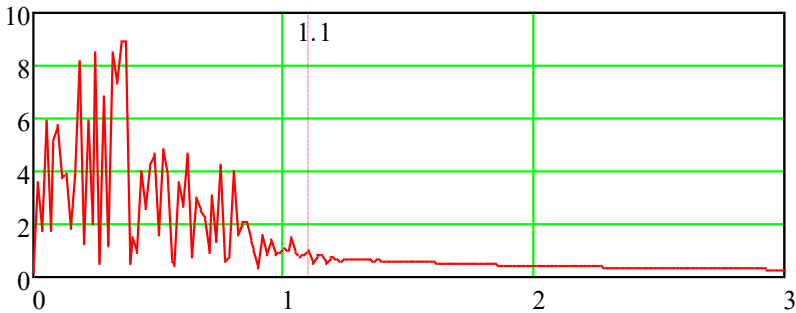


Рис. 3. Фур’є спектр даних, наведених на рис. 2. По осі абсцис відкладено частоту в герцах, по осі ординат – значення модуля спектра у відносних одиницях

У таблиці 1 наведено значення чотирьох основних мод спектра, поданого на рисунку 2. Параметри розміщено в порядку спадання амплітуд спектральних компонент. У першому стовпці подано частоти компонент у герцах, у другому – значення амплітуд відповідних спектральних складових у відносних одиницях, а в третьому – кратність частот.

Таблиця 1. Значення п’яти основних складових спектра, поданого на рис. 2

Частота в Гц	Амплітуда у відн. од.	Кратність частот
0.01667	224.95	1
0.11667	113.71	7
1.8	79.616	107.998
3.6	53.03	215.996

Дані наведено в порядку спадання амплітуд спектральних компонент. У лівому стовпці вказано частоти компонент у герцах, у правому – амплітуди відповідних спектральних компонент у відносних одиницях.

Із даних таблиці випливає, що спектральна структура сигналу формується основною гармонікою та низкою кратних їй складових, зокрема сьомою, сто восьмою та двісті шістнадцятою гармоніками.

Наведені в таблиці значення надалі використовуються в алгоритмі як початкові наближення в просторі ознак під час пошуку мінімуму критерію методом Левенберга–Марквардта в межах серії випробувань Монте–Карло.

У дослідженні було розглянуто дві моделі: першу – з дванадцятьма вільними параметрами, і другу – з шістнадцятьма. Інакше кажучи, йдеться про моделі, у яких сигнал описується суперпозицією відповідно трьох і чотирьох осциляторів. Як показник якості моделі обрано значення критерію в точці глобального мінімуму. Аналіз критерію оптимальності засвідчив, що друга модель узгоджується з експериментальними даними краще, ніж перша.

Для наочного пояснення особливостей процедури нелінійної оптимізації доцільно розглянути кілька фрагментів критерію (2) в околі глобального мінімуму. При цьому всі параметри моделі фіксуються на оптимальних значеннях, а змінюється лише одна вибрана пара параметрів у межах малої околиці глобального мінімуму. За таких умов критерій можна інтерпретувати як функцію двох змінних.

На рисунку 4 критерій подано як функцію параметрів $\lambda_{2,3}$ і $\lambda_{3,3}$ у моделі (6). Ці параметри відповідають частотам другої та третьої мод у спектрі модельного сигналу. На горизонтальній площині рисунка відображено топографію критерію, яку у вигляді карти подано на рисунку 5. Із наведених зображень видно, що навіть поблизу глобального мінімуму існує велика кількість локальних мінімумів, і саме це становить одну з головних труднощів нелінійної оптимізації. Водночас для параметрів, що входять до моделі лінійно, за обраного критерію локальні екстремуми не виникають, а існує лише один глобальний мінімум. Це ілюструють рисунки 6 і 7.

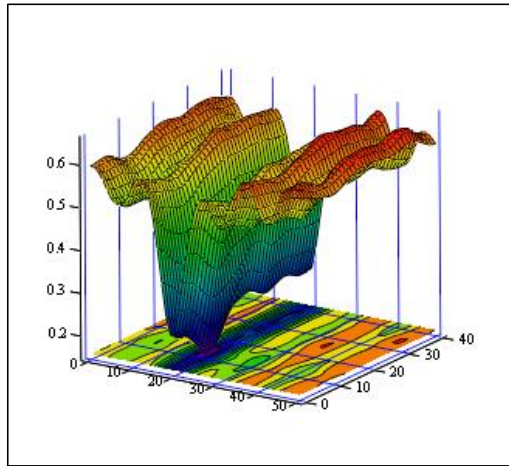


Рис. 4. Критерій як функція параметрів $\lambda_{2,3}$ і $\lambda_{3,3}$ у моделі (6)

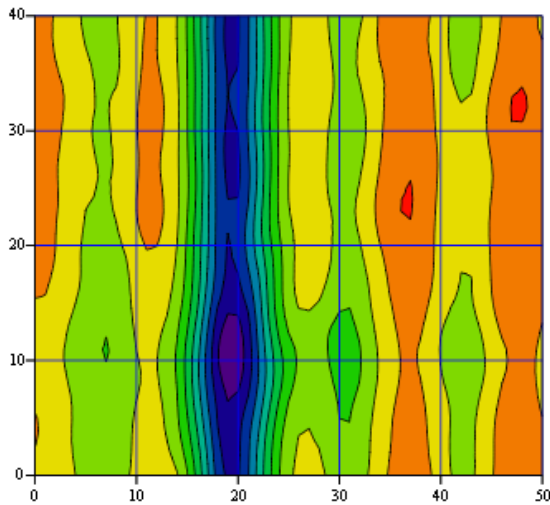


Рис. 5. Топографія критерію рисунка 3

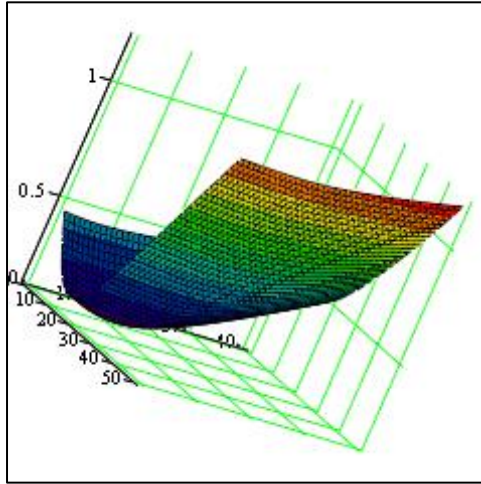


Рис. 6. Поведінка критерію в окрузі двох лінійно вхідних в модель параметрів $\lambda_{2,2}$ і $\lambda_{3,2}$

Рисунок 7 дозволяє побачити поведінку критерію в окрузі двох лінійно вхідних в модель параметрів $\lambda_{2,2}$ і $\lambda_{3,2}$. Ці параметри є амплітудами другої та третьої мод в спектрі моделі сигналу.

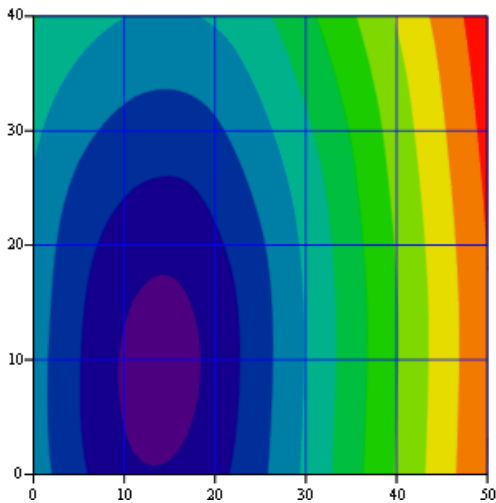


Рис. 7. Топографія критерію рисунка 5

Наведені вище розрахунки подано для того, щоб продемонструвати повну послідовність дій у комп'ютеризованій методиці оцінювання вільних параметрів моделей із використанням нелінійної оптимізації. При цьому вони виконані лише для однієї з компонент запису коливальних швидкостей. Для іншої компоненти обчислювальна процедура є аналогічною та здійснюється за тим самим технологічним алгоритмом.

Найбільшу фізичну значущість мають насамперед знайдені значення вільних параметрів моделі, які використовуються для ідентифікації стану досліджуваного об'єкта, тобто параметри, зафіксовані у співвідношенні (6).

Особливу увагу слід приділяти демпфувальним характеристикам, оскільки саме вони відображають добротність системи, тобто її здатність акумулювати енергію зовнішніх збурень і зберігати її протягом певного часу. Висока добротність, що відповідає малому декременту затухання на окремих частотах моделі, свідчить про підвищену чутливість конструкції до зовнішніх впливів саме в цих частотних діапазонах. Наприклад, зменшення декремента в динаміці може розглядатися як ознака того, що об'єкт наближається до стану, за якого навіть незначне зовнішнє навантаження здатне спричинити руйнування.

Для забезпечення надійності результатів кількість обчислювальних циклів має бути достатньо великою. Разом із тим зі зростанням розмірності моделі така вимога істотно ускладнює обчислювальний процес. Проте за наявності достатньо обґрунтованих апріорних уявлень про очікуваний результат кількість циклів можна скоротити без суттєвої втрати якості оцінювання [9].

Висновки

Порівняння результатів розрахунків для вимірювань, виконаних із часовим інтервалом у пів року, дає підстави стверджувати, що для об'єктів вибраного типу параметри, використані для ідентифікації їхнього стану, є достатньо стабільними й можуть бути надійною основою для довготривалого моніторингу. Для виявлення вираженого тренду зміни точки, що характеризує стан об'єкта в просторі параметрів, інтервал у шість місяців, очевидно, є недостатнім. Водночас такий часовий крок у режимних спостереженнях є практично доцільним, оскільки дає змогу своєчасно зафіксувати початок істотних структурних змін і не пропустити критичний момент. На теперішній час досліджуваний об'єкт перебуває у стійкому стаціонарному стані.

REFERENCES

1. Pitman, E. (1979). *Some basic theory for statistical inference*. Chapman and Hall.
2. Mostovyi, S. V., Mostovyi, V. S., & Panchenko, M. V. (2008). Seismic signal and microseismic background (mathematical models and estimates). *Geoinformatics*, (1), 28–38.
3. Mostovyi, V. S. (2013). *Modeli system monitorynhu heofizychnykh polei*. (Author's dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences) [in Ukrainian].
4. Plessix, R.-E. (2006). A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications. *Geophysical Journal International*, 167, 495.
5. Mostovyi, V. S. (2008). Optimal detection of signals against the background of microseismic noise. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (1), 106–110.
6. Mostovyi, V. S. (1996). *Models of detection and identification of signals in geophysical field monitoring systems* (Author's dissertation for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences).
7. Mostovyi, S. V., & Mostovyi, V. S. (2011). Problems of filtering in geophysical information processing. *Geoinformatics*, (2), 48–52.
8. Pujol, J. (2007). The solution of nonlinear inverse problems and the Levenberg-Marquardt method. *Geophysics*, 72(4), W1–W16.
9. Cherevko, I., Kril, T., Mostovyy, V., & Shcherbyna, S. (2025). Structural health monitoring of heritage buildings under military actions. *International Journal of Conservation Science*, 16(4), 1755–1774. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2025.04.09>

Стаття надійшла до редакції 06.01.26, надійшла після рецензування 20.02.26, прийнята 06.03.26

The article was received 06.01.26, received after revision 20.02.26, accepted 06.03.26

Мостовий Василь Сергійович

доктор фіз.-мат наук, старший науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

Адреса робоча: бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1759-1893> **e-mail:** vasyll.mostovy@gmail.com

Коробенко Антон Петрович

аспірант, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Адреса робоча: Україна, 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 64/13

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-7099-6535> **e-mail:**

anton.korobenko.off@gmail.com

УДК 004.94:502.5:004.8

Dmytro Mosiichuk, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3864-1019> *e-mail*: deusplus@gmail.com

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

INFORMATION TECHNOLOGY FOR MONITORING ENVIRONMENTAL THREATS USING AEROSPACE DATA AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

***Abstract.** The article is devoted to solving an urgent scientific and applied problem related to the development of information technology for monitoring environmental threats based on the integration of aerospace data and artificial intelligence methods. Modern environmental monitoring systems require the use of advanced information technologies capable of processing large volumes of heterogeneous spatial data and providing reliable information about the state of natural and anthropogenic systems.*

The proposed approach is based on the integrated use of satellite remote sensing data, unmanned aerial vehicle observations, geoinformation technologies, and machine learning algorithms. The developed information technology includes methods for collecting, processing, and analyzing aerospace data, as well as algorithms for automated identification of environmental threats.

Special attention is paid to the use of artificial intelligence methods for automated interpretation of satellite images and the detection of environmental changes in marine and coastal ecosystems. Neural network models are used to perform classification and segmentation of remote sensing data, which significantly increases the accuracy of identifying environmental hazards. The main functional subsystems of the technology have been identified, which provide a consistent information processing cycle – from the collection of aerospace data to the formation of analytical materials for assessing the state of the natural environment.

The proposed technology also provides the creation of geoinformation models for assessing environmental risks and forecasting the development of hazardous processes. The developed algorithms make it possible to automate the processes of environmental monitoring and support decision-making in environmental management systems.

The results of the research can be used in environmental monitoring systems, decision support systems for environmental safety, and in the development of intelligent geoinformation systems. Further research should be directed towards improving artificial intelligence algorithms for processing aerospace data and expanding the capabilities of environmental monitoring information systems.

***Keywords:** information technology, environmental monitoring, aerospace data, artificial intelligence, satellite images, geoinformation systems, ecological threats.*

© Д.І. Мосійчук, 2026

Д.І. Мосійчук

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

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНИХ ЗАГРОЗ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АЕРОКОСМІЧНИХ ДАНИХ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

***Анотація.** Статтю присвячено розв'язанню актуального науково-практичного завдання, що полягає у розробленні інформаційної технології моніторингу екологічних загроз на основі інтегрованого використання аерокосмічних даних та методів штучного інтелекту. У сучасних умовах зростання антропогенного навантаження на природне середовище, зміни клімату та техногенних впливів виникає необхідність створення ефективних систем екологічного моніторингу, здатних забезпечити оперативне виявлення змін стану довкілля та оцінювання екологічних ризиків.*

Запропонований підхід базується на комплексному використанні супутникових даних дистанційного зондування Землі, спостережень із застосуванням безпілотних апаратів, геоінформаційних технологій та алгоритмів машинного навчання. Розроблена інформаційна технологія включає методи збору, оброблення та аналізу аерокосмічних даних, а також алгоритми автоматизованого виявлення екологічних загроз.

Особливу увагу приділено застосуванню методів штучного інтелекту для автоматизованого дешифрування супутникових зображень та виявлення змін природного середовища. Для підвищення точності аналізу супутникових даних використовуються нейронні мережі, що забезпечують ефективну класифікацію та сегментацію об'єктів природного середовища.

Запропонована інформаційна технологія дозволяє формувати геоінформаційні моделі оцінювання екологічних ризиків та прогнозування розвитку небезпечних екологічних процесів. Отримані результати можуть бути використані у системах екологічного моніторингу, системах підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки та у наукових дослідженнях природного середовища.

***Ключові слова:** інформаційні технології, екологічний моніторинг, аерокосмічні дані, штучний інтелект, дистанційне зондування Землі, геоінформаційні системи.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.190-198>

Вступ

У сучасних умовах розвитку техногенної цивілізації проблема забезпечення екологічної безпеки природного середовища набуває особливої актуальності. Зростання антропогенного навантаження на природні екосистеми, інтенсивний розвиток промисловості, транспортної інфраструктури та урбанізованих територій призводять до погіршення стану довкілля та виникнення нових екологічних ризиків.

Особливої гостроти проблема моніторингу екологічних загроз набуває в умовах глобальних змін клімату та зростання кількості техногенних аварій і природних катастроф. У таких умовах виникає необхідність створення сучасних інформаційних технологій, здатних забезпечити оперативне отримання, оброблення та аналіз великого обсягу геопросторових даних про стан природного середовища.

Одним із найбільш ефективних інструментів дослідження природних процесів є дистанційне зондування Землі. Супутникові системи спостереження забезпечують можливість отримання оперативної інформації про стан природного середовища на великих територіях. Сучасні супутникові платформи Sentinel, Landsat, WorldView та інші забезпечують регулярні спостереження за станом земної поверхні, водних ресурсів, рослинного покриву та урбанізованих територій.

Разом з тим, використання аерокосмічних даних супроводжується необхідністю обробки великих обсягів інформації, що потребує застосування сучасних методів аналізу даних. У цьому контексті важливу роль відіграють методи штучного інтелекту та машинного навчання, які дозволяють автоматизувати процес інтерпретації супутникових зображень та підвищити точність виявлення екологічних змін.

Сучасні алгоритми комп'ютерного зору та нейронні мережі дозволяють здійснювати автоматичне дешифрування супутникових зображень, що значно підвищує ефективність екологічного моніторингу. Застосування таких технологій відкриває нові можливості для створення інтелектуальних систем аналізу геопросторових даних.

У зв'язку з цим актуальним науковим завданням є розроблення інформаційної технології моніторингу екологічних загроз, що базується на інтегрованому використанні аерокосмічних даних, геоінформаційних систем та методів штучного інтелекту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема використання дистанційного зондування Землі для дослідження природних процесів розглядається у роботах багатьох українських та зарубіжних науковців. Значний внесок у розвиток методів дистанційного дослідження природного середовища зробили роботи В.І. Лялька, М.О. Попова, О.М. Трофимчука, Г.Я. Красовського, Л.Д. Грекова та інших учених [1-4].

У працях В.І. Лялька досліджено спектральні характеристики природних об'єктів та можливості використання супутникових знімків для дослідження стану рослинного покриву. М.О. Попов розробив методи прогнозування врожайності сільськогосподарських культур на основі багатоспектральних даних дистанційного зондування.

О.М. Трофимчук та Г.Я. Красовський досліджували методи космічного моніторингу забруднення земель та оцінювання екологічного стану територій. У їхніх роботах значну увагу приділено застосуванню геоінформаційних систем для аналізу екологічних процесів [1, 3].

У сучасних дослідженнях значну увагу приділяють використанню безпілотних літальних апаратів для екологічного моніторингу. Використання БПЛА дозволяє отримувати детальні зображення земної поверхні з високою просторовою роздільною здатністю та забезпечує оперативний збір інформації про стан природного середовища, що відображено в працях В.М. Триснюка та О.А. Машкова [5, 7, 8].

Разом з тим, більшість існуючих систем екологічного моніторингу орієнтовані на використання окремих джерел даних і не забезпечують інтегрованого аналізу різномірної інформації. Крім того, існуючі методи оброблення аерокосмічних даних часто потребують значного обсягу ручної роботи та не забезпечують достатнього рівня автоматизації.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення нових інформаційних технологій, що забезпечують автоматизований аналіз аерокосмічних даних на основі методів штучного інтелекту.

Мета роботи. Метою дослідження є підвищення ефективності екологічного моніторингу шляхом розроблення інформаційної технології автоматизованого аналізу аерокосмічних даних із використанням методів штучного інтелекту для виявлення екологічних загроз.

Об'єктом дослідження є процес застосування інформаційної технології автоматизованого аналізу аерокосмічних даних із використанням методів штучного інтелекту для виявлення екологічних загроз у природних та техногенно навантажених територіях, зокрема у морських акваторіях та прибережних зонах.

З огляду на все вищесказане, можна виділити основні завдання досліджень:

- розроблення інформаційної технології моніторингу екологічних загроз на основі інтегрованого використання аерокосмічних даних дистанційного зондування Землі та даних безпілотних літальних апаратів;
- удосконалення алгоритмів автоматизованого аналізу аерокосмічних зображень із застосуванням методів штучного інтелекту для виявлення змін стану природного середовища;
- розроблення моделей та програмних засобів оцінювання екологічного стану морських акваторій і прибережних зон та формування карт екологічних загроз для підтримки прийняття управлінських рішень у системах екологічного моніторингу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сучасний стан розвитку систем екологічного моніторингу характеризується зростанням обсягів просторових даних, що отримуються за допомогою супутникових систем дистанційного зондування Землі, безпілотних літальних апаратів та наземних сенсорних мереж. Використання аерокосмічних даних створює передумови для формування нових інформаційних технологій, здатних забезпечити оперативний аналіз стану природного середовища та своєчасне виявлення екологічних загроз. Разом з тим, значна кількість отриманої інформації потребує застосування інтелектуальних методів її оброблення, що обумовлює необхідність використання алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання.

У межах даного дослідження запропоновано інформаційну технологію моніторингу екологічних загроз, що базується на інтегрованому використанні аерокосмічних даних дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем та методів штучного інтелекту. Реалізація запропонованої технології передбачає виконання кількох взаємопов'язаних етапів, які відповідають поставленим у роботі завданням дослідження [6].

Розроблення інформаційної технології моніторингу екологічних загроз на основі аерокосмічних даних

Першим етапом дослідження є формування інформаційної технології моніторингу екологічних загроз на основі інтеграції різних джерел просторових даних. Основу інформаційної бази системи становлять супутникові знімки, отримані з космічних платформ дистанційного зондування Землі, а також дані, отримані за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Застосування супутникових даних дозволяє здійснювати широкомасштабний моніторинг природного середовища, що включає оцінювання стану водних акваторій, рослинного покриву, ґрунтового середовища та техногенно навантажених територій. Супутникові системи Sentinel, Landsat та інші забезпечують отримання багатоспектральних зображень, які дозволяють проводити аналіз екологічних процесів на основі спектральних характеристик об'єктів.

У свою чергу, використання безпілотних літальних апаратів дозволяє отримувати зображення високої просторової роздільної здатності, що є особливо важливим для детального аналізу стану прибережних зон, локалізації зон забруднення та ідентифікації техногенних об'єктів. Комбіноване використання супутникових та аерофотознімків забезпечує формування комплексної інформаційної бази для проведення екологічного моніторингу.

Удосконалення алгоритмів автоматизованого аналізу аерокосмічних зображень із використанням методів штучного інтелекту

Другим важливим етапом дослідження є удосконалення алгоритмів автоматизованого аналізу аерокосмічних даних із використанням методів штучного інтелекту. Аналіз супутникових зображень традиційними методами потребує значних часових витрат і не завжди забезпечує необхідний рівень точності. У зв'язку з цим застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє значно підвищити ефективність оброблення даних.

У рамках дослідження розглядається можливість використання згорткових нейронних мереж для класифікації та сегментації супутникових зображень. Такі моделі дозволяють автоматично визначати об'єкти природного середовища, виявляти зміни стану територій та ідентифікувати потенційні джерела екологічних загроз.

Процес автоматизованого аналізу аерокосмічних зображень включає кілька основних етапів. На першому етапі проводиться попередня обробка супутникових знімків, яка включає радіометричну та геометричну корекцію, нормалізацію спектральних каналів та формування багатоспектральних композитів. Далі здійснюється виділення інформативних ознак, що характеризують спектральні та текстурні властивості об'єктів.

Наступним етапом є застосування алгоритмів машинного навчання для класифікації зображень. На основі навчальних вибірок формуються моделі розпізнавання об'єктів, які дозволяють автоматично визначати типи земної поверхні, локалізувати зони забруднення та виявляти антропогенні зміни природного середовища.

Особливу увагу в дослідженнях приділено використанню методів глибокого навчання, які забезпечують можливість оброблення складних багатовимірних даних. Використання нейронних мереж дозволяє підвищити точність класифікації об'єктів та зменшити кількість помилок при інтерпретації супутникових зображень.

Розроблення моделей оцінювання екологічного стану територій та формування карт екологічних загроз

Третім етапом дослідження є розроблення моделей оцінювання екологічного стану територій та формування карт екологічних загроз. Для цього використовується геоінформаційний підхід, який дозволяє інтегрувати різномірні просторові дані та виконувати їх комплексний аналіз.

На основі результатів автоматизованого аналізу супутникових зображень формується база даних просторових показників, що характеризують стан природного середовища. До таких показників належать індекси рослинності, індекси водних поверхонь, показники техногенного навантаження та інші параметри.

Отримані дані використовуються для побудови геоінформаційних моделей оцінювання екологічних ризиків. За допомогою просторового аналізу визначаються території з підвищеним рівнем екологічної небезпеки, а також проводиться оцінювання можливих наслідків антропогенного впливу на природне середовище. Основні джерела забруднення зазвичай відомі, однак масштаби їх впливу змінюються залежно від обсягів, ступеня очищення та просторової динаміки процесів. Це потребує оконтурювання плям, де спектральні характеристики яскравості виходять за межі встановлених нормативних значень.

У роботі розроблено алгоритм автоматизованої векторизації меж забруднених ділянок (рис. 1).

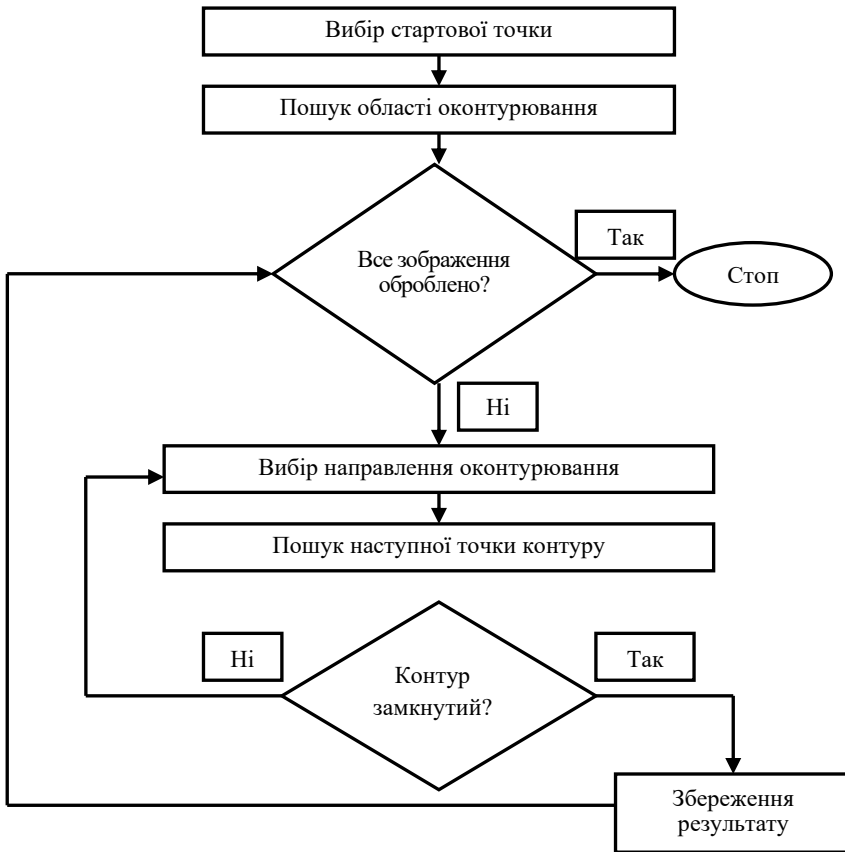


Рис. 1. Алгоритм векторизації контуру виділеної ділянки

Запропонована методика автоматизованого оконтурювання та векторизації забезпечує підвищену точність і об'єктивність в оцінюванні параметрів забруднення на основі супутникових знімків, із перспективою інтеграції у сучасні ГІС-платформи (рис. 2).



Рис. 2. Забруднення Чорного моря береговим стоком

Одним із важливих результатів застосування запропонованої інформаційної технології є формування карт екологічних загроз. Такі карти дозволяють візуалізувати результати аналізу аерокосмічних даних та визначити просторову структуру екологічних ризиків.

Вони можуть використовуватися органами управління природними ресурсами та екологічними службами для прийняття управлінських рішень.

Таким чином, запропонована інформаційна технологія забезпечує інтеграцію аерокосмічних даних, методів штучного інтелекту та геоінформаційних технологій для вирішення задач моніторингу екологічних загроз. Її застосування дозволяє підвищити оперативність отримання інформації про стан природного середовища, покращити точність виявлення екологічних змін та забезпечити ефективну підтримку прийняття рішень у сфері екологічної безпеки.

Висновки

У статті розглянуто підходи до створення інформаційної технології моніторингу екологічних загроз на основі інтегрованого використання аерокосмічних даних та методів штучного інтелекту. Дослідження спрямоване на підвищення ефективності екологічного моніторингу шляхом автоматизації аналізу даних дистанційного зондування Землі та застосування сучасних методів оброблення геопросторової інформації.

У результаті дослідження сформовано концептуальні засади інформаційної технології, що базується на використанні супутникових даних дистанційного зондування Землі, матеріалів аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів, геоінформаційних технологій та алгоритмів штучного інтелекту. Визначено основні функціональні підсистеми технології, які забезпечують послідовний цикл оброблення інформації – від збору аерокосмічних даних до формування аналітичних матеріалів для оцінювання стану природного середовища.

Запропоновано підходи до автоматизованого аналізу аерокосмічних зображень із використанням методів машинного навчання, що дозволяє підвищити точність класифікації об'єктів природного середовища та оперативно виявляти екологічні зміни. На основі інтеграції результатів аналізу даних дистанційного зондування та геоінформаційного моделювання обґрунтовано можливість формування карт екологічних загроз для оцінювання екологічного стану територій.

Отримані результати можуть бути використані при створенні інформаційно-аналітичних систем екологічного моніторингу та систем підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки. Подальші дослідження доцільно спрямувати на удосконалення алгоритмів штучного інтелекту для оброблення аерокосмічних даних та розширення можливостей інформаційних систем екологічного моніторингу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Красовський, Г. Я., Трофимчук, О. М., Крета, Д. Л., Клименко, В. І., Пономаренко, І. Г., & Суходубов, О. О. (2005). Синтез картографічних моделей забруднення земель техногенним пилом з використанням космічних знімків. *Екологія і ресурси*, 12, 37–55.
2. Греков, Л. Д., Красовський, Г. Я., & Трофимчук, О. М. (2007). *Космічний моніторинг забруднення земель техногенним пилом*. Київ: Наукова думка.
3. Трофимчук, О. М., Адаменко, О. М., & Триснюк, В. М. (2021). *Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду*. Івано-Франківськ: Супрун В. П. ISBN 978-617-7468-53-9. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902083>
4. Лялько, В. І. (2002). Стан і перспективи розвитку аерокосмічних досліджень Землі в Україні. *Космічна наука і технологія*, 8(2–3), 29–35.
5. Триснюк, В. М. (2016). Система управління екологічною безпекою природних і антропогенно-модифікованих геосистем. *Системи обробки інформації*, 12, 185–188.
6. Триснюк, Т. В., & Мосійчук, Д. І. (2024). Інформаційні системи спостереження морських акваторій та прилеглих зон з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів. *Екологічна безпека та природокористування*, 2(50), 130–141. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.130-141>
<https://es-journal.in.ua/issue/view/18243>
7. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic models of Dniester River basin probable flooding. *Centrul Universitar Nord din Baia Mare*, 1, 61–67.
8. Машков, О. А., Триснюк, В. М., Мамчур, Ю. В., Жукаускас, С. В., Нігородова, С. А., & Курило, А. В. (2019). Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, 1(19), 69–77. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/162108/03-Mashkov.pdf>

Стаття надійшла до редакції 13.01.26, надійшла після рецензування 02.02.26, прийнята 26.02.26

REFERENCES

1. Krasovskyi, H. Ya., Trofymchuk, O. M., Kreta, D. L., Klymenko, V. I., Ponomarenko, I. H., & Sukhodubov, O. O. (2005). Syntez kartohrafichnykh modelei zabrudnennia zemel tekhnohennym pylom z vykorystanniam kosmichnykh znimkiv [Synthesis of cartographic models of land pollution by technogenic dust using satellite imagery]. *Ekolohiia i resursy*, 12, 37–55. [in Ukrainian]

2. Hrekov, L. D., Krasovskyi, H. Ya., & Trofymchuk, O. M. (2007). *Kosmichnyi monitorynh zabrudnennia zemel tekhnohennym pylom* [Space monitoring of land pollution by technogenic dust]. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian]
3. Trofymchuk, O. M., Adamenko, O. M., & Trysnyuk, V. M. (2021). *Heoinformatsiini tekhnologii zakhystu dovkillia pryrodno-zapovidnoho fondu* [Geoinformation technologies for environmental protection of nature reserve areas]. Ivano-Frankivsk: Suprun V. P. ISBN 978-617-7468-53-9. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902083> [in Ukrainian]
4. Lialko, V. I. (2002). Stan i perspektyvy rozvytku aerokosmichnykh doslidzhen Zemli v Ukraini [State and prospects of aerospace research of the Earth in Ukraine]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia*, 8(2–3), 29–35. [in Ukrainian]
5. Trysnyuk, V. M. (2016). Systema upravlinnia ekolohichnoiu bezpekoiu pryrodnykh i antropohenno-modifikovanykh heosystem [Environmental safety management system of natural and anthropogenically modified geosystems]. *Systemy obrobky informatsii*, 12, 185–188. [in Ukrainian]
6. Trysnyuk, T. V., & Mosiichuk, D. I. (2024). Informatsiini systemy sposterezhennia morskyykh akvatorii ta prylehlykh zon z vykorystanniam dystantsiino pilotovanykh litalnykh aparaty [Information systems for monitoring marine areas and adjacent zones using unmanned aerial vehicles]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya*, 2(50), 130–141. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.130-141>
<https://es-journal.in.ua/issue/view/18243> [in Ukrainian]
7. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic models of Dniester River basin probable flooding. *Centrul Universitar Nord din Baia Mare*, 1, 61–67.
8. Mashkov, O. A., Trysnyuk, V. M., Mamchur, Yu. V., Zhukauskas, S. V., Nihorodova, S. A., & Kurylo, A. V. (2019). Novyi pidkhid do syntezy vidnovliuuchoho keruvannya dlia dystantsiino pilotovanykh litalnykh aparaty ekolohichnoho monitorynhu [A new approach to the synthesis of recovery control for unmanned aerial vehicles in environmental monitoring]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannya*, 1(19), 69–77. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/162108/03-Mashkov.pdf> [in Ukrainian]

The article was received 13.01.26, received after revision 02.02.26, accepted 26.02.26

Мосійчук Дмитро Іванович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3864-1019> **e-mail:** deusplus@gmail.com

УДК 621.391

Vladyslav Vasylenko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

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

PERSPECTIVES ON THE DEVELOPMENT OF 5G WIRELESS TECHNOLOGIES IN UKRAINE

Abstract. *This paper investigates the prospects for the development of 5G wireless technologies in Ukraine within the context of post-war reconstruction and the digital transformation of the economy. The article analyzes the prerequisites for deploying next-generation networks, namely: the rapid development of related technologies, the exponential growth in the number of users and connected devices, and the significant increase in data traffic. The main application areas of 5G technologies are considered. The paper systematizes the recommendations developed by the International Telecommunication Union (ITU) aimed at fulfilling the requirements for primary 5G use cases, highlighting key scenarios for utilizing 5G in the development of software applications and services. The current state of the telecommunications market as of 2026 is reviewed, including the results of the initial pilot launches in the country's largest cities and key development vectors.*

The study substantiates the role of 5G wireless technologies as a foundational infrastructure for implementing innovative services that require ultra-reliable low-latency communication and a high density of connections.

Keywords: *5G, telecommunications, wireless technologies, post-war reconstruction, service, data traffic.*

В.М. Василенко

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, м. Київ, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ БЕЗПРОВІДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 5G В УКРАЇНІ

Анотація. *Роботу присвячено дослідженню перспектив розвитку безпроводних технологій 5G в Україні в контексті повоєнного відновлення та цифрової трансформації економіки. В статті представлено аналіз передумов, а саме: розвитку різноманітних технологій, суттєвого зростання кількості користувачів та пристроїв, а також значного збільшення трафіку, що сприяли впровадженню технологій нового покоління 5G. Розглянуто основні сфери використання безпроводних технологій 5G.*

Було систематизовано рекомендації, розроблені Міжнародною спільною електрозв'язку (ITU), які мають на меті задовольнити основні варіанти використання безпроводних технологій 5G, а також виділено основні сценарії використання технологій 5G при розробці застосунків, додатків і т.д. Розглянуто поточний стан телекомунікаційного ринку станом на 2026 рік, зокрема результати перших пілотних запусків у найбільших містах країни та ключові вектори розвитку.

Обґрунтовано роль використання безпроводних технологій 5G для впровадження інноваційних сервісів із низькою затримкою та високою щільністю підключень.

Ключові слова: *5G, телекомунікації, безпроводні технології, повоєнне відновлення, сервіс, трафік.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.199-204>

Вступ

З розвитком різноманітних технологій і суттєвим збільшенням кількості користувачів та пристроїв, а також значним збільшенням трафіку (відео – 4К, 8К, аудіо) постало питання в дослідженні та впровадженні технологій нового покоління 5G (стандарт 5G/IMT-2020) [1, 2].

Перехід до технологій п'ятого покоління 5G є важливою необхідністю для цифрової трансформації економіки. Для України впровадження стандарту 5G набуває безпрецедентного значення не лише як еволюційний технологічний крок, а й як фундаментальна складова повоєнного відновлення. Це є базовою умовою для забезпечення конкурентоспроможності держави, модернізації промисловості та інтеграції українського цифрового простору до європейського ринку.

Метою роботи є дослідження перспектив розвитку та стратегічних напрямів впровадження безпроводних технологій 5G в Україні в умовах повоєнного відновлення.

Виклад основного матеріалу дослідження

На рис. 1 представлений аналіз зростання використаного трафіку в період з третього кварталу 2014 року по третій квартал 2015 року [2].

Як можемо бачити, зростання використаного інформаційного трафіку за визначений період складає приблизно 65 відсотків, що є досить значним за такий малий період. Це викликано як збільшенням кількості нових користувачів, так і збільшенням об'єму даних, що споживають користувачі.

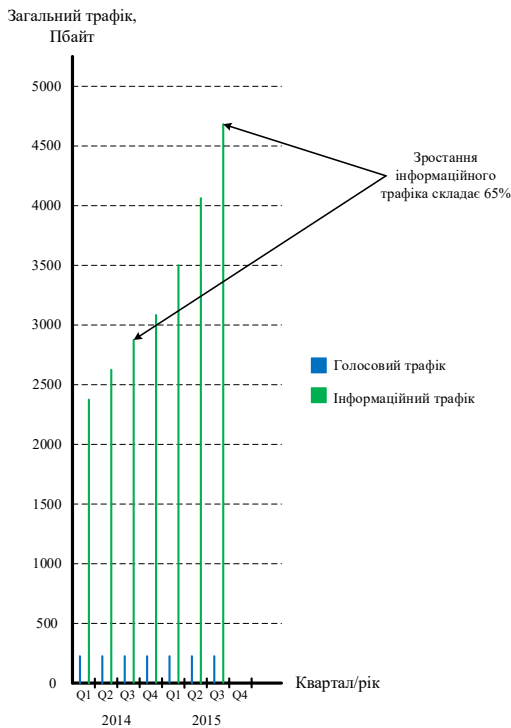


Рис. 1. Аналіз зростання використаного трафіку в період з третього кварталу 2014 року по третій квартал 2015 року

На рис. 2 зображений приріст кількості користувачів за третій квартал 2015 року по регіонах [2].

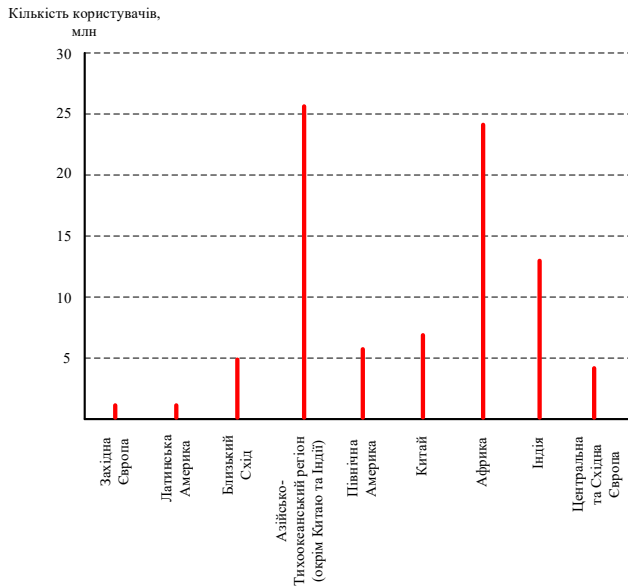


Рис. 2. Приріст кількості користувачів за третій квартал 2015 року по регіонах

Збільшення користувачів за вказаний період склав приблизно 83 млн користувачів. Це стало можливим завдяки зростаючій доступності технологій (LTE) та їх впровадженню, зменшенню вартості пристроїв (смартфонів, планшетів і т.д.), забезпеченню достатнього покриття. Можемо бачити, що найбільший приріст був у Азійсько-Тихоокеанському регіоні, Африці (Нігерія, М'янма) та Індії.

З розвитком штучного інтелекту, багатопрофільним впровадженням інформаційних технологій в промисловому та корпоративному сегментах, розвитком технологій віртуальної реальності, доповненої реальності – безпроводні технології четвертого покоління не могли задовольнити всі вимоги, які постали в нових реаліях.

Також важливою причиною розвитку безпроводних технологій 5G є стрімкий перехід до нового етапу промислової революції Industry 4.0. Це зумовлено необхідністю передачі та обробки великої кількості даних, зменшення затримок та збільшення мобільності користувачів.

На рис. 3 представлені порівняльні характеристики безпроводних технологій 5G та 4G.

З рис. 3 можемо бачити, що 5G мають значні переваги в порівнянні з 4G, а саме: збільшення у 10 разів середньої швидкості передачі даних користувача, збільшення мобільності користувачів на 42%, збільшення у 20 разів пікової швидкості передачі даних, зменшення затримок сигналу у 10 разів, збільшення щільності (кількості) пристроїв у 10 разів на квадратний кілометр.

З цього випливають рекомендації, розроблені Міжнародною спілкою електровз'язку (International Telecommunication Union – ITU), які мають на меті задовольнити основні варіанти використання безпроводних технологій 5G, а саме [3]:

1) Покращений мобільний широкосмуговий доступ (Enhanced mobile broadband – eMBB). Основною метою є забезпечення високої швидкості передачі для обробки та використання великого обсягу даних;

2) Зв'язок з низькою затримкою та високою надійністю (Ultra-reliable and low-latency communication – URLLC);

3) Масовий машинний зв'язок (Massive machine-type communication – mMTC) є характерним для додатків/сервісів з великою кількістю пристроїв. Прикладом є набір датчиків, які передають невеликий обсяг даних.

Згідно з цими рекомендаціями можна виділити основні сценарії використання технологій 5G при розробці застосунків, додатків, інше, які представлені на рис. 4.

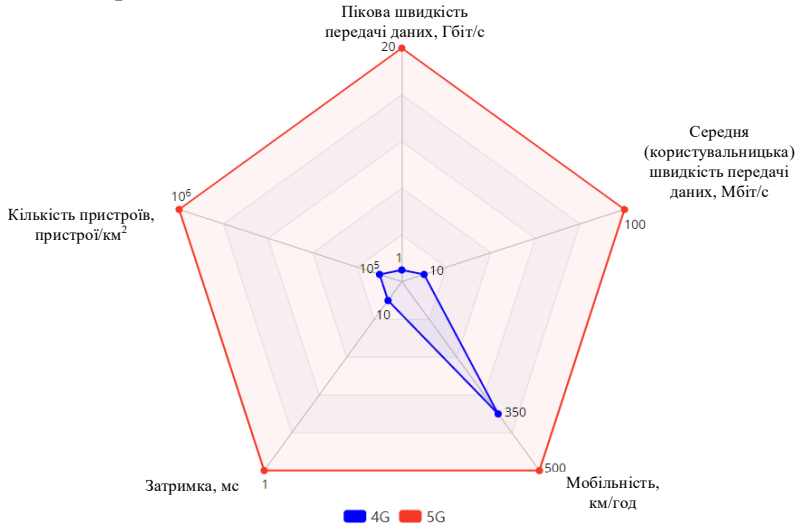


Рис. 3. Порівняльні характеристики безпроводових технологій 5G та 4G

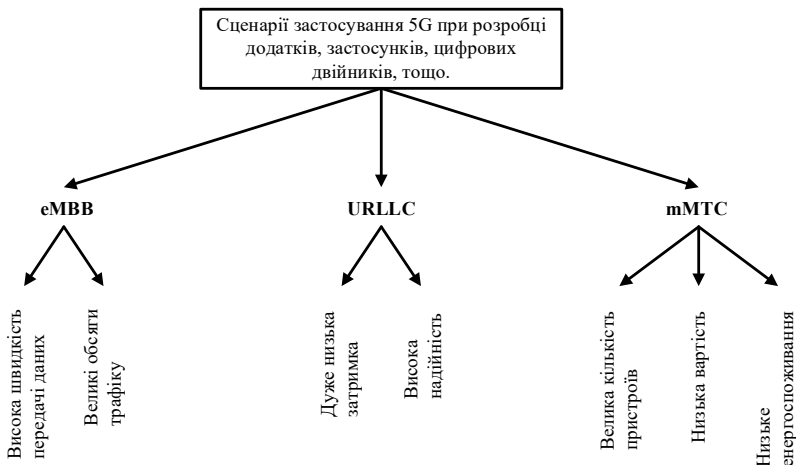


Рис. 4. Сценарії використання технологій 5G

Аналізуючи характеристики технологій 5G та можливі сценарії застосування, можемо прийти до висновку, що для їх реалізації та впровадження не обов'язково потрібно намагатись досягнути максимальних

значень основних характеристик. Потрібно оцінювати їх важливість для досягнення оптимальної ефективності для певного сценарію. На рис. 5 представлена діаграма пріоритетності основних характеристик для кожного сценарію, згідно з [4-7].

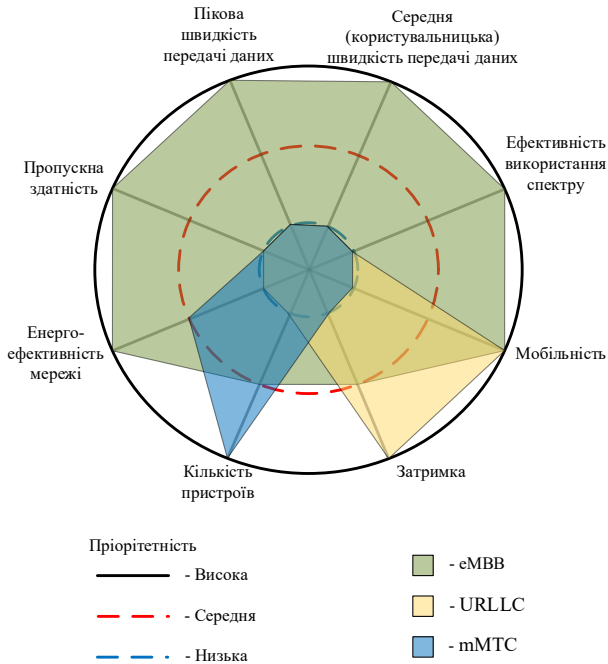


Рис. 5. Діаграма пріоритетності основних характеристик для основних сценаріїв

Для eMBB характерними є забезпечення високої швидкості передачі, високої мобільності та енергоефективності мережі для передачі/обробки та використання великого обсягу даних. Прикладами застосування даного сценарію є віртуальна реальність, доповнена реальність, потоковий стрімінг, фіксований безпроводний доступ. URLLC має забезпечувати для додатків дуже низьку затримку і велику надійність при передачі даних, що може бути критичним для таких сфер, як робототехніка, безпілотний транспорт, енергомережі, дистанційна медицина. mMTC в основному призначений для інтернету речей та додатків, де застосовується дуже велика кількість пристроїв. Причому дані пристрої передають невеликі обсяги даних (передають команди, дані з пристроїв, наприклад – температура, вологість, т.д.), але і мають бути енергоефективними з дуже великим часом безперервної роботи. Основними прикладами є «Розумне місто», логістика, трекінг, моніторинг інфраструктури.

У січні 2026 року в Україні офіційно стартували перші пілотні проекти. Це критичний етап для тестування сумісності 5G із військовим обладнанням. Перші міста, де було розпочато тестування 5G, це Львів, Бородянка, Харків [8]. До кінця 2026 року тестування має охопити також Київ та Одесу. Враховуючи реалії безпекового та економічного стану в Україні, основними пріоритетними напрямками є:

1) Інженерний моніторинг, де завдяки технології eMBB є можливість розгортання великої кількості датчиків на об'єктах критичної інфраструктури та будівлях для оцінки технічного стану споруд;

2) Військовий напрямок, зокрема завдяки технології URLLC є можливість координації безпілотних систем (рої дронів, роботизовані платформи);

3) Телемедицина – дистанційна діагностика, реабілітація тощо.

4) Аграрна сфера – для керування безпілотними тракторами, де важливою складовою є точність позиціонування техніки.

Висновки

Впровадження 5G в Україні перейшло в практичну площину, що дає в подальшому суттєві перспективи для повоєнного відновлення та економічного розвитку. Визначені пріоритетні напрямки для України, а саме: інженерний моніторинг, військовий напрямок, телемедицина, аграрна сфера, здатні забезпечити найшвидший та найбільший економічний ефект в короткостроковій перспективі. Подальший розвиток 5G в Україні потребує іноземних інвестицій для масштабування мереж та створення сприятливих умов на ринку. Поступова реалізація даних кроків дасть змогу стати одним із цифрових лідерів Східної Європи в найближчому майбутньому.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Ericsson (2015) Ericsson Mobility Report, November 2015 <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>
2. Ericsson (2025) Ericsson Mobility Report, November 2025 <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>
3. Vision, requirements and evaluation guidelines for satellite radio interface(s) of IMT-2020. Report ITU-R M.2514-0. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2514-2022-PDF-E.pdf
4. ITU-R, IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recommendation ITU-R M.2083, September 2015. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/r-rec-m.2083-0-201509-1!pdf-e.pdf
5. Report ITU-R M.2410-0 (2017). Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). November 2017.
6. Report ITU-R M.2411-0 (2017). Requirements, evaluation criteria and submission templates for the development of IMT-2020. November 2017.
7. Report ITU-R M.2412-0 (2017). Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. November 2017.
8. 5G is already in Ukraine – all about speed, tariffs and working without electricity, <https://thedigital.gov.ua/news/zviazok-ta-internet/5g-vze-v-ukrayini-vse-pro-shvydkist-taryfy-ta-robotu-bez-svitla>

Стаття надійшла до редакції 15.12.25, надійшла після рецензування 05.02.26, прийнята 26.02.26

The article was received 15.12.25, received after revision 05.02.26, accepted 26.02.26

Василенко Владислав Михайлович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу інформаційних та комунікаційних технологій Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

УДК 004.6:004.22:004.93:528.9

Viacheslav Podlipaiev, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Associate
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-0520> **e-mail:** pva_hvu@ukr.net

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

ARCHITECTURE OF GEO-INFORMATION RESOURCE FOR FORMING AN INFORMATION-ANALYTICAL ENVIRONMENT ANALYTICS

***Abstract.** The work is devoted to solving a scientific and practical problem, which consists in developing the architecture of a geoinformation resource for the formation of an information-analytical environment for an analyst. The purpose of the research is to increase the efficiency of information-analytical work by using approaches to building a geoinformation resource, forming an information space based on the results of geospatial intelligence. Basic research indicates a steady trend towards an increase in the volume of data and the frequency of their receipt from different sources, which requires the use of new methods of their collection and processing. The processing of each type of information is constantly being improved and organized using automation tools. However, the analyst's ability to simultaneously process the entire data set and conduct its analysis remains limited. The modern requirements for the efficiency of information processing and the reduction of terms for its provision, this issue is very relevant, therefore, the search for new approaches in this direction is an important development process. More than 80% of information has a spatial reference, it is advisable to use a geoinformation approach for the complex processing and analysis of the obtained intelligence information. Analysis of existing solutions shows that the requirements are met to some extent. However, the existing functionality needs to be improved, and some creation, due to its absence.*

The use of semi-automated (automated) methods for processing textual documents improves the efficiency of an analyst's work, as it eliminates the need to read through all incoming materials and allows them to focus solely on performing specific tasks. The implemented algorithms for semi-automated (automated) processing of textual materials enable their handling directly at the point of information extraction, which significantly reduces the time required for search and processing.

The results of the study will help increase the efficiency of the analyst's work, namely, reduce the time spent on data preparation, and provide the opportunity to focus on their processing and obtaining a more accurate result (conclusion, forecast).

Keywords: *information technologies, information and analytical work, geoinformation systems, data systematization, geospatial information, geovisualization, geospatial analysis.*

В.О. Подліпаєв

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

АРХІТЕКТУРА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО РЕСУРСУ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА АНАЛІТИКА

***Анотація.** Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання, що полягає в розробці архітектури геоінформаційного ресурсу для формування інформаційно-аналітичного середовища аналітика. Метою дослідження є підвищення ефективності інформаційно-аналітичної роботи шляхом використання підходів до побудови геоінформаційного ресурсу, формування інформаційного простору за результатами геопросторової розвідки. Основні дослідження свідчать про сталу тенденцію до збільшення обсягу даних та періодичності їх надходження з різних джерел, що, в свою чергу, потребує використання нових способів їх збору та обробки. Оброблення кожного виду інформації постійно вдосконалюється та організовується з використанням засобів автоматизації. Однак, залишаються обмеженими можливості аналітика щодо одночасної обробки всього масиву даних та проведення його аналізу. Враховуючи сучасні вимоги до оперативності оброблення інформації, скорочення термінів щодо її надання, це питання є дуже актуальним, тому пошук нових підходів у цьому напрямку є важливим процесом розвитку. Більше 80% інформації має просторову прив'язку, тому доцільно для комплексної обробки та аналізу добутої розвідувальної інформації використовувати геоінформаційний підхід. Аналіз існуючих рішень показує, що висунені вимоги в деякій мірі задовольняються. Однак, наявний функціонал потребує покращення, а деякий – створення, у зв'язку з його відсутністю.*

Результати дослідження сприятимуть підвищенню ефективності роботи аналітика, а саме: зменшенню часу на підготовлення даних та наданню можливості зосередитися на їх обробленні та отриманні більш точного результату (висновку, прогнозу).

***Ключові слова:** інформаційні технології, інформаційно-аналітична робота, геоінформаційні системи, систематизація даних, геопросторова інформація, геовізуалізація, геопросторовий аналіз.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.205-213>

Вступ

Одним із основних завдань в процесі інформаційно-аналітичної діяльності є комплексна обробка зібраної інформації, яка отримується з різних джерел.

Значні обсяги даних та періодичність їх надходження потребують використання нових способів їх збору та обробки [1]. Оброблення кожного виду інформації постійно вдосконалюється та організовується з використанням засобів автоматизації.

Однак, залишаються обмеженими можливості аналітика щодо одночасної обробки всього масиву даних та проведення його аналізу. Враховуючи сучасні вимоги до оперативності оброблення інформації, скорочення термінів щодо її надання, це питання є дуже актуальним, тому пошук нових підходів у цьому напрямку є важливим процесом розвитку.

В умовах сьогодення потік даних постійно збільшується, стає неможливо покладатися лише на інтуїцію та досвід аналітиків, потрібно рухатися вперед, адаптуватися до змін. Все частіше при аналізі великих обсягів даних звертаються до комп'ютерних систем та мереж.

Існує проблемне питання відсутності ресурсу, де доступні (зберігаються) матеріали від усіх наявних джерел у структурованому вигляді. Наявні ресурси, що існують на ринку, мають часткове вирішення необхідного аналітику функціоналу. Тому, кожен аналітик у більшості випадків, отримуючи завдання, самостійно для себе здійснює пошук необхідних даних, наповнює спеціалізовані власні бази, проводить обробку, аналіз, прогнозування та ін. Напрацювання кожного фахівця у подальшому залишається, у кращому випадку, у директорії (на ПЕОМ чи МНІ), та в подальшому, при переведенні чи звільненні фахівця-аналітика, який займався певним напрямком, може бути втрачено. Такий підхід ускладнює процес виконання завдань та створює необхідність повторного пошуку, накопичення, обробки та аналізу.

Також існує проблема несумісності баз між підрозділами. Обмінюючись необхідними даними для виконання різного роду завдань, багато часу витрачається на синхронізацію та приведення до єдиної структури інформації, яка збережена у спеціалізованих базах кожного джерела.

Такий підхід має суттєві недоліки в плані оперативності виконання аналітичних завдань, тому є необхідність в ресурсі, що матиме можливість відображати значну кількість варіацій доступних даних.

З огляду на зазначене вище, та враховуючи те, що більше 80% інформації має просторову прив'язку до конкретної території або координат на поверхні Землі, доцільно для комплексної обробки та аналізу інформації, яка отримується з різних джерел, використовувати геоінформаційний підхід.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інформаційно-аналітична робота являє собою сукупність заходів, які здійснюються аналітиками щодо збору, повної обробки даних та інформаційних матеріалів, отриманих від різних джерел, супроводження спеціалізованих інформаційних баз даних, а також розроблення на основі проведеної роботи інформаційно-аналітичних (інформаційних) документів та доведення їх до споживачів інформації [2].

Діяльність аналітика включає значну кількість етапів роботи з розвідувальними даними (відомостями, матеріалами). Виконання кожного завдання має певні часові обмеження, тому при витраті великої кількості часу для підготовки даних (збір, систематизація, накопичення та узагальнення) у аналітика залишається менше часу для їх опрацювання (оцінки, обробки, аналізу, зіставлення, інтеграції, інтерпретації та прогнозування), що, в свою чергу, негативно впливає на кінцевий результат.

Аналіз завдань аналітика показує, що частина з них вже відпрацьована геопросторовою розвідкою і тому для швидкого, найбільш правильного висновку аналітику необхідний ресурс, що даватиме можливість відображати інформацію з різних джерел в єдиному середовищі.

В провідних країнах світу геопросторовій розвідці приділяється значна увага, особливо при вирішенні аналітичних завдань у різних сферах діяльності, а саме результатам геопросторового аналізу з використанням геоінформаційних систем, систем управління базами даних та спеціальних алгоритмів і моделей комплексної обробки та аналізу даних від різних джерел.

Унікальними достоїнствами ГПР є можливість проведення всебічного геопросторового аналізу операційного середовища, точність і достовірність аналітичних оцінок, простота та наочність представлення інформації. Завдяки тому за 20 останніх років структури ГПР займають важливе місце в забезпеченні аналітичних структур всіх рівнів всебічною і надійною інформацією.

Основним інструментом аналітика для доступу до результатів ГПР у провідних країнах світу є спеціалізовані геоінформаційні ресурси, які дозволяють йому витратити набагато менше часу на пошук та збір інформації, оскільки в них присутні способи автоматизації роботи щодо інтеграції різномірних даних.

Україна теж не стоїть на місці, а робить певні кроки в цьому напрямку та надала світу цілу низку спеціалізованих геоінформаційних систем, які використовуються для забезпечення інформаційно-аналітичної роботи.

Аналіз існуючих систем показує, що в усіх використовується принцип відображення подій на карті, з можливістю введення обробки та аналізу, але є низка недоліків [3, 4]. Висунені вимоги в деякій мірі задовольняються. Однак, наявний функціонал потребує покращення, а деякий – створення, у зв'язку з його відсутністю.

Мета роботи. Метою дослідження є підвищення ефективності інформаційно-аналітичної роботи шляхом використання підходів до побудови геоінформаційного ресурсу, формування інформаційного простору за результатами геопросторової розвідки.

Об'єктом дослідження є процес роботи з геопросторовими даними різномірних інформаційних ресурсів під час вирішення аналітичних завдань.

Виклад основного матеріалу дослідження

Пропонується архітектура ресурсу (платформи) для відображення матеріалів, отриманих від усіх наявних джерел, що передбачає модульну побудову відкритого типу. Суть якої полягає в тому, що ресурс (платформа) складається з окремих модулів (пов'язаних або не пов'язаних між собою), кожен з яких виконує певну функцію, що дозволяє ефективно вирішувати різноманітні завдання. Можна додавати інші модулі [5, 6].

На ресурсі зберігаються лише настройки, необхідні для його функціонування та підключення баз даних. Вся інформація знаходиться у спеціалізованих базах даних кожного джерела, та при підключенні до ресурсу буде відображатися лише те, що дозволив власник інформації.

Ефективність функціонування геоінформаційної системи залежить від правильного визначення складу та наповнення геоінформаційних ресурсів.

Ресурс, що призначений для відображення інформації від наявних джерел та даних результатів геопросторового аналізу, побудований з чотирьох основних модулів: “Геопросторова підтримка”; “Вхідна інформація”; “Аналітика”; “Робочий інформаційний простір” (Рис. 1).

Модуль “Геопросторова підтримка” – призначений для забезпечення експерта-аналітика необхідними геопросторовими даними загального користування.

- Він має такий набір функцій:
- пошук необхідних даних за визначеними критеріями (назва адміністративної одиниці, населеного пункту, координати тощо);
 - можливість використання окремих шарів даних, які аналітик може додати до свого робочого інформаційного простору;
 - можливість додавання нових даних до вже існуючих шарів;
 - створення власних (нових) карт, які можуть бути використані як базові для загального користування;
 - можливість включення та порівняння/зіставлення декількох шарів.

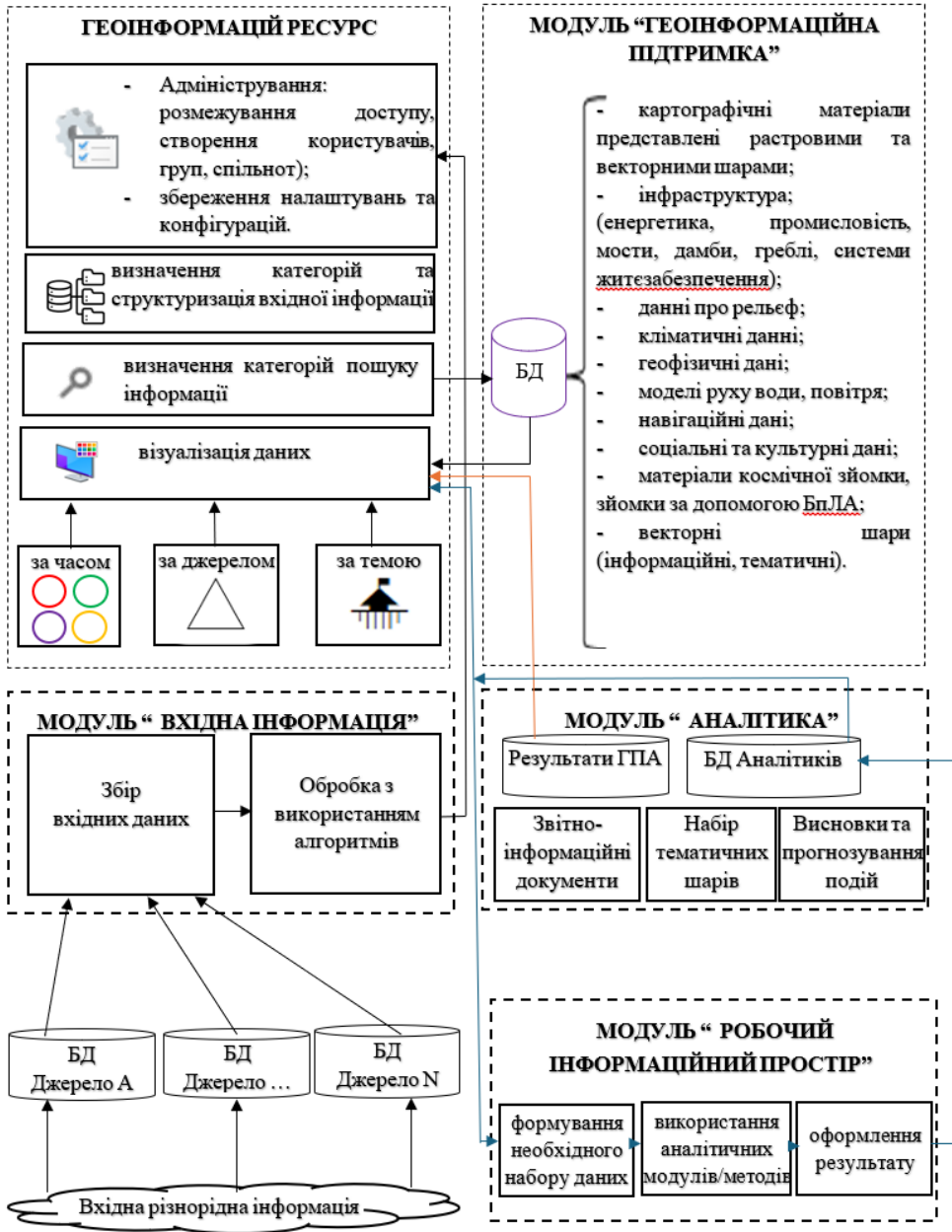


Рис. 1. Концептуальна структура ресурсу

Цей модуль являється обов'язковим для функціонування будь-якої ГІС, оскільки неможливо провести аналіз території, не маючи базового набору геопросторових даних [7] (Рис. 2).

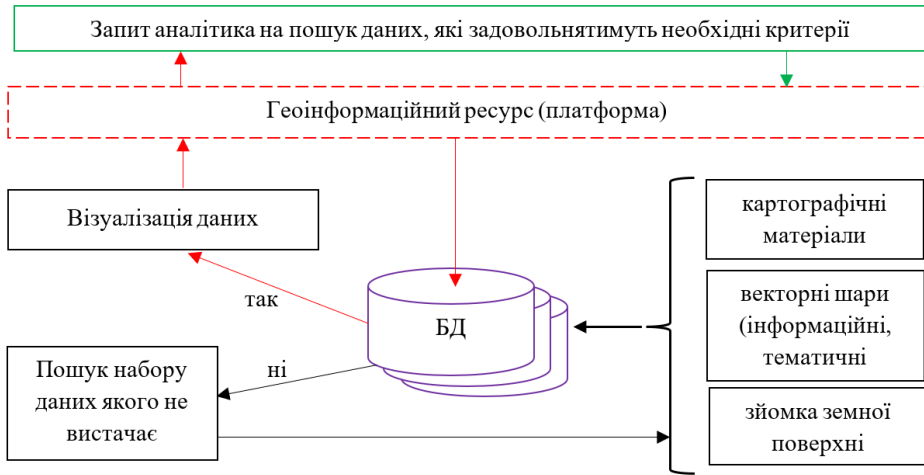


Рис. 2. Концептуальна схема роботи модуля

Базовий набір геопросторових даних – сукупність геопросторових даних як уніфікована основа інтегрування та спільного використання в геоінформаційних системах геопросторових даних, що надходять з різних джерел [8-11].

Без даних про територію геоінформаційна підтримка неможлива в принципі.

Модуль “Вхідна інформація” – відіграє одну з ключових ролей, функціонування ресурсу, що полягає у відображенні актуальної та достовірної інформації, отриманої від різних джерел.

Він має такий набір функцій:

збір інформації щодо різноманітних даних від усіх доступних джерел (може включати як ручні, так і автоматизовані процеси) [12];

попередня обробка даних;

приведення даних до визначених форм та структури, що забезпечуватиме їх сумісність та інтеграцію до програмного забезпечення, яке використовується, та інших подібних систем;

актуалізація даних, що дає можливість наглядно оцінити наявність інформації, отриманої за певні проміжки часу;

фільтрування даних, що є необхідним для виявлення та виправлення помилок, невірних даних чи таких, які не можуть існувати, пропущені значення, або такі, що дублюються та ін.;

класифікація даних, передбачає поділ за певною тематикою, джерелом тощо;

відображення (геовізуалізація) даних.

Цей модуль призначений для відображення даних, використовуючи індикатори актуальності, форми, що вказують на джерело походження інформації, та іконки (значки), що візуально-інтуїтивно розкривають тематику повідомлення. Схема роботи модуля відображена на Рис. 3.

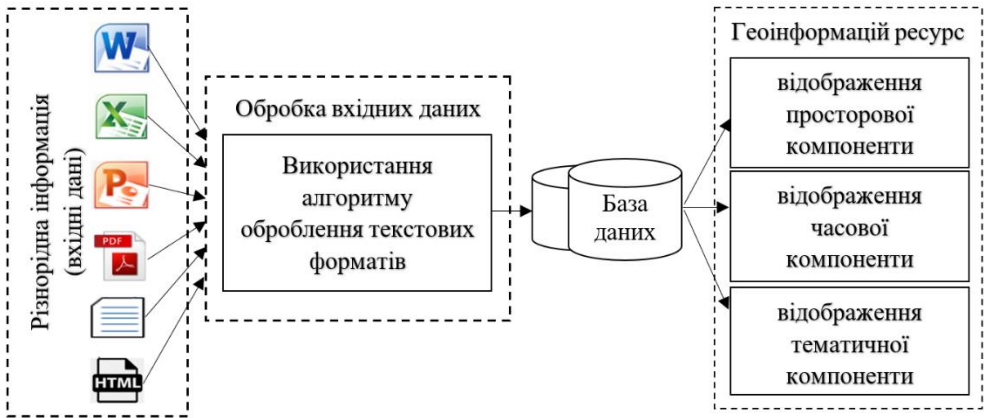


Рис. 3. Концептуальна схема роботи модуля

Модуль має дві складові:

Перша – систематизація відображення вхідної інформації (розгорнута на інтеграційній платформі), тобто присвоєння необхідних значків, форм та індикаторів для інформації, яка буде додаватися до модуля;

Друга – підготовка даних до відображення (знаходиться у місці знаходження інформаційного ресурсу), тобто проведення операцій з текстовими файлами, зображеннями та файлами формату *.PDF, щодо виокремлення просторової та часової інформації з текстового масиву даних, проведення класифікації отриманих повідомлень, формування файлу з просторовою прив'язкою (GEOJSON, KML, SHP), внесення його змісту до необхідної бази даних.

Використання принципу генералізації інформації дозволить узагальнювати та спростувати відображення просторових даних у відповідності до масштабу та призначення карти.

Висновки

Підходи, які застосовані у ресурсі, для відображення вхідної інформації з використанням просторової, часової, тематичної компоненти та за джерелом надходження, забезпечують зберігання та відображення інформації у структурованому та інтуїтивно зрозумілому форматі.

Використання напівавтоматизованого (автоматизованого) методу обробки текстових документів покращує ефективність роботи аналітика, оскільки йому не потрібно перечитувати всі матеріали, що надходять, а можна зосередитися лише на виконанні конкретного завдання. Реалізовані алгоритми напівавтоматизованої (автоматизованої) обробки текстових матеріалів дозволяють здійснювати їх опрацювання безпосередньо в місці добування інформації, що буде значно економити час пошуку та обробку.

Застосування алгоритму кластеризації підвищить читабельність карти та дозволить аналітику не розпорюшувати увагу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Подліпаєв, В. О. (2019). Застосування трансдисциплінарного підходу при інформаційно-аналітичному забезпеченні процесів прийняття рішень органами військового управління тактичної ланки. *Збірник наукових праць "Системи обробки інформації"*, 4 (159), 58-64.
2. "Воєнна розвідка. Інформаційно-аналітична діяльність. Терміни та визначення", Військовий стандарт 01.101.004 (Видання 3), ВСТ 01.101.004-2019(03).
3. Подліпаєв, В. О. (2020). Дослідження можливостей сучасного програмного забезпечення щодо створення геоінформаційних систем трансдисциплінарного використання слабо структурованих даних. *Збірник наукових праць "Системи управління, навігації та зв'язку"*, 3(61), 4-12.
4. Подліпаєв, В. О. (2019). Аналіз підходів щодо створення геоінформаційних платформ для забезпечення геоінформаційної підтримки прийняття рішення на тактичному рівні. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, Науково-технічний журнал*, № 4(37), 113-121.
5. Подліпаєв, В. О. (2019). Концепція побудови системи трансдисциплінарного інформаційного забезпечення геопросторового аналізу з компонентною архітектурою *Збірник наукових праць "Системи управління, навігації та зв'язку"*, 3(55), 135-142.
6. Лященко, Р. В., Кузнецов, Д. О., Повещенко, О. В., Козін, В. В., Стасенко, Д. В. (2020). Розподілена система збору, обробки, зберігання і пошуку геопросторових даних при веденні геопросторової розвідки. *Системи озброєння і військова техніка*, 1(61), 118-127.
7. Подліпаєв, В. О. (2019). Базовий набір типових геоінформаційних ресурсів для здійснення геоінформаційної підтримки та ведення геопросторового аналізу. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2(54).
8. Закон України від 13.04.2020 № 554-IX "Про національну інфраструктуру геопросторових даних".
9. "Воєнна розвідка. Геопросторова розвідка. Терміни та визначення", Військовий стандарт 01.101.007 (Видання 1), ВСТ 01.101.007-2017(01).
10. "Доктрина з геопросторової підтримки Збройних Сил України", ВКП 10-30(16).01, 2020.
11. Бойовий статут сухопутних військ "Геопросторова підтримка сухопутних військ Збройних Сил України", БП 3-30(11).01, 2020.
12. Галайда, А., Четверіков, Б., Колб, І. (2022). Методика створення геоінформаційного онлайн-ресурсу для управління територіальною громадою.
13. Кухарський, І. А., Подліпаєв, В. О., Атрасевич, О. В., Шумейко, В. О. (2013). Визначення та основні поняття геопросторової розвідки. *Системи обробки інформації: збірник наукових праць*, 6 (113), 96-98.

Стаття надійшла до редакції 23.01.26, надійшла після рецензування 17.02.26, прийнята 04.03.26

REFERENCES

1. Podlipaiev, V. O. (2019). Application of the transdisciplinary approach in information-analytical support of the decision-making process in military command bodies. *Information Processing Systems*, 4(159), 58–64.
2. Military intelligence. Information and analytical activities: Terms and definitions. (2019). *Military Standard MST 01.101.004-2019 (Edition 3)*.
3. Podlipaiev, V. O. (2020). Research on the possibilities of modern software for the creation of geoinformation systems of transdisciplinary use of poorly structured data. *Control, Navigation and Communication Systems*, 3(61), 4–12.

4. Podlipaiev, V. O. (2019). Analysis of approaches for the creation of a geoinformation platform to provide geoinformation support for decision making at the tactical level. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 4(37), 113–121.
5. Podlipaiev, V. O. (2019). The concept of building a system for transdisciplinary information support of geospatial analysis with a component architecture. *Control, Navigation and Communication Systems*, 3(55), 135–142.
6. Lyashchenko, R. V., Kuznetsov, D. O., Poveshchenko, O. V., Kozin, V. V., & Stasenko, D. V. (2020). Distributed system for collecting, processing, storing and searching geospatial data in geospatial reconnaissance. *Weapons Systems and Military Equipment*, 1(61), 118–127.
7. Podlipaiev, V. O. (2019). Basic set of typical geoinformation resources for the implementation of geoinformation support and processing of geospatial analysis. *Control, Navigation and Communication Systems*, 2(54).
8. Law of Ukraine No. 554-IX “On the National Infrastructure of Geospatial Data”. (2020).
9. Military intelligence. Geospatial intelligence: Terms and definitions. (2017). *Military Standard VST 01.101.007-2017 (Edition 1)*.
10. Doctrine on geospatial support of the Armed Forces of Ukraine. (2020). *VKP 10-30(16).01*.
11. Combat regulations of the ground forces: Geospatial support of the ground forces of the Armed Forces of Ukraine. (2020). *BP 3-30(11).01*.
12. Galayda, A., Chetverikov, B., & Kolb, I. (2022). Methodology for creating an online geoinformation resource for managing a territorial community.
13. Kukharsky, I. A., Podlipaiev, V. O., Atrasevich, O. V., & Shumeiko, V. O. (2013). Definition and basic concepts of geospatial intelligence. *Information Processing Systems*, 6(113), 96–98.

The article was received 23.01.26, received after revision 17.02.26, accepted 04.03.26

Подліпасв Вячеслав Олександрович

кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-0520> **e-mail:** pva_hvu@ukr.net

УДК 621.391

Liliia Zaitseva, Postgraduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0668-711X> **e-mail:** lili5990n@ukr.net

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

METHOD OF PARAMETRIC ADAPTATION OF PARALLEL AND SEQUENTIAL TURBO CODES USING NEURAL NETWORKS

Abstract. *The work is devoted to the study of increasing the efficiency of functioning of modern wireless technologies 5G and 6G. The article presents a method of parametric adaptation of parallel and sequential turbo codes using neural networks of the multilevel perceptron type and the decoding uncertainty indicator.*

The use of neural networks of the multilevel perceptron type for adjusting the external logarithmic ratios of the likelihood functions of probabilistic algorithms for decoding parallel and sequential turbo codes is considered.

Turbo codes are decoded using the maximum a posteriori probabilities (MAP) decoding algorithm, which calculates the posterior probability of each decoded symbol, minimizing the probability of an information symbol (bit) error.

The aim of the work is to develop a method for parametric adaptation of parallel and sequential turbo codes using neural networks of the multilevel perceptron type and a decoding uncertainty indicator.

The use of the decoding uncertainty indicator for parallel and sequential turbo codes at the training stage when determining the weight coefficients of the weight matrix and when functioning of neural networks is proposed.

Keywords: 5G, 6G, wireless technologies, turbo codes, neural networks, multi-layer perceptron, decoding uncertainty.

Л.І. Зайцева

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

МЕТОД ПАРАМЕТРИЧНОЇ АДАПТАЦІЇ ПАРАЛЕЛЬНИХ ТА ПОСЛІДОВНИХ ТУРБО КОДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Анотація. *Роботу присвячено дослідженню підвищення ефективності функціонування сучасних безпроводних технологій 5G та 6G. В статті представлено метод параметричної адаптації паралельних та послідовних турбо кодів з використанням нейронних мереж типу багаторівневий перцептор та показника невизначеності декодування.*

Розглянуто використання нейронних мереж типу багаторівневий перцептор для коригування зовнішніх логарифмічних відношень функцій правдоподібності ймовірнісних алгоритмів декодування паралельних та послідовних турбо кодів. Декодування турбо кодів відбувається за допомогою алгоритму декодування по максимуму апостеріорної ймовірності MAP (maximum a posteriori probabilities), який здійснює розрахунок апостеріорної ймовірності кожного декодованого символу, мінімізуючи ймовірність помилки інформаційного символу (біта).

Метою роботи є розробка методу параметричної адаптації паралельних та послідовних турбо кодів з використанням нейронних мереж типу багаторівневий перцептрон та показника невизначеності декодування. Запропоновано використання показника невизначеності декодування паралельних та послідовних турбо кодів на етапі навчання при визначенні вагових коефіцієнтів матриці ваг та при функціонуванні нейронних мереж.

Ключові слова: 5G, 6G, безпроводні технології, турбо коди, нейронні мережі, багаторівневий перцептрон, невизначеність декодування.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.214-224>

Вступ

Безпроводовий зв'язок має вирішальне значення в багатьох секторах, таких як телекомунікації, аерокосмічна галузь, оборона, охорона здоров'я, Інтернет речей та побутова електроніка. Ці системи продовжують розвиватися від покоління до покоління. Наразі використовуються безпроводові системи 5G, і досліджуються перспективні – мережі 6G або Beyond 5G (B5G) [1-3]. Ці майбутні системи спрямовані на забезпечення наднадійного, низькозатримкового, високопродуктивного та штучно-інтелектуального з'єднання. Досягнення цих цілей поставило нові виклики, які виходять за межі можливостей традиційних методів кодування каналів, таких як коди з низькою щільністю перевірки на парність (LDPC) та турбо коди.

Цілями безпроводових комунікаційних систем наступного покоління, особливо 6G, є покращене з'єднання, зменшення затримки та вища швидкість передачі даних. Для систем 6G досліджуються схеми кодування квадратурної амплітудної модуляції (QAM), використання квазіциклічних кодів з малою перевіркою на парність (QC-LDPC), модуляції QAM з турбо кодами, модуляції QAM з LDPC-кодами та модуляції QAM з полярними кодами [4-5].

Метою роботи є розробка методу параметричної адаптації паралельних та послідовних турбо кодів з використанням нейронних мереж типу багаторівневий перцептрон та показника невизначеності декодування.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для покращення характеристик ЛВФП турбо кодів при паралельному та послідовному з'єднанні РСЗК, будемо використовувати MLP-нейронну мережу (MLP – Multilayer Perceptron, багатосаровий перцептрон).

Запропоновано алгоритм корекції ЛВФП через MLP для турбо кодів.

1. Ініціалізація.

Для пакету t :

1) Отримуємо з каналу прийняті символи u_t .

2) Ініціалізуємо апріорні ЛВФП (якщо перший декодер турбо коду):

$$L_a^{(0)}(u_k) = 0 \quad \forall k, \quad (1)$$

де u_k – k -й інформаційний біт.

2. Обчислення зовнішнього ЛВФП декодера турбо коду.

Декодування турбо кодів відбувається за допомогою алгоритму декодування по максимуму апостеріорної ймовірності MAP (maximum a posteriori probabilities), який здійснює розрахунок апостеріорної ймовірності кожного декодованого символу, мінімізуючи ймовірність помилки

інформаційного символу (біта). Декодування турбо кодів відбувається за такою ж решітчастою діаграмою, за якою працює кожен RSCC турбо коду.

Наприклад, алгоритм декодування MAP двох біт турбо коду для виду RSCC (1, 5/7) показаний на рис. 1.

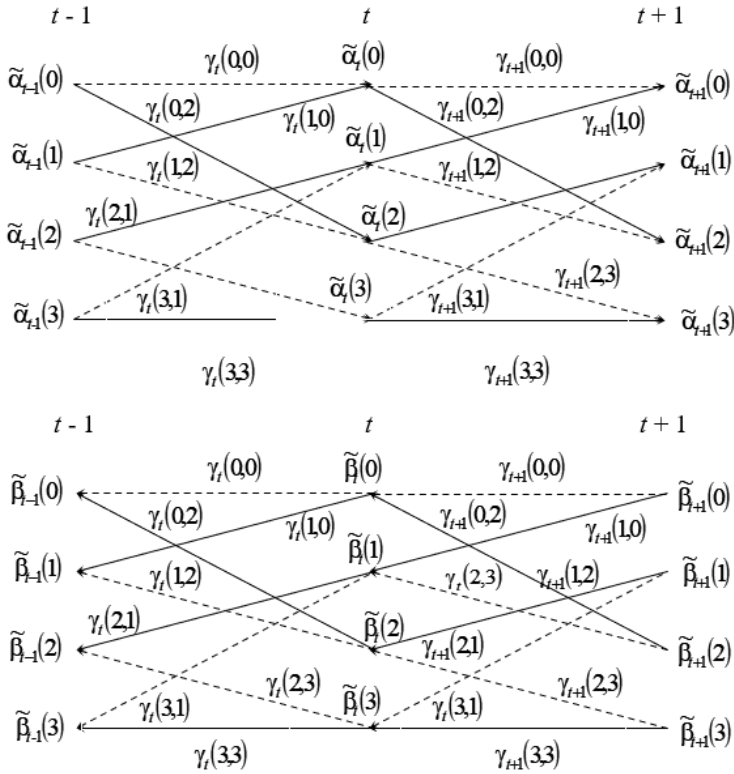


Рис. 1. Алгоритм декодування MAP двох біт турбо коду для виду RSCC (1, 5/7)

Декодування відбувається за двома напрямками: у першому напрямку (від початку блоку до кінця) для кожного стану турбо коду обчислюються прямі та перехідні рекурсії, у другому напрямку (з кінця блоку до початку) відбувається розрахунок зворотних рекурсій, використовуючи перехідні рекурсії, отримані при першому напрямку обчислень.

Логарифмічне відношення функцій правдоподібності про переданий біт $L(u_i)$ залежить від каналної інформації $L_c(y_i)$, апіорної інформації про переданий біт $L_a(x_i)$ та апостеріорного LLR, виробленого безпосередньо самим декодером $L_e(x_i)$. Тому при декодуванні біта u_i для обчислень першим декодером на ітерації декодування $j, j \in \overline{1, I}$, де I – загальна кількість ітерацій декодування, вираз LLR може бути записано таким чином:

$$L^{1,j}(x_i) = \log \frac{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_i=1}} \tilde{\alpha}_{t-1}^{(1)}(s') \cdot \tilde{\beta}_t^{(1)}(s) \cdot \gamma_t^{(1)}(s',s)}{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_i=0}} \tilde{\alpha}_{t-1}^{(1)}(s') \cdot \tilde{\beta}_t^{(1)}(s) \cdot \gamma_t^{(1)}(s',s)} = L_c^{1,j}(y_i) + L_a^{1,j}(x_i) + L_e^{1,j}(x_i), \quad (2)$$

де $L_c^{1,j}(y_t)$ – канална інформація, $L_e^{1,i}(x_t)$ – апостеріорне LLR біту даних x_t , $\tilde{\alpha}_{t-1}^{(1)}(s')$ – нормалізоване значення прямої рекурсії $\alpha_{t-1}^{(1)}(s')$, $\tilde{\beta}_t^{(1)}(s)$ – нормалізоване значення зворотної рекурсії $\beta_t^{(1)}(s)$.

Відповідно, для другого декодера отримаємо:

$$L^{2,j}(x_t) = \log \frac{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=1}} \tilde{\alpha}_{t-1}^{(2)}(s') \cdot \tilde{\beta}_t^{(2)}(s) \cdot \gamma_t^{(2)}(s',s)}{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=0}} \tilde{\alpha}_{t-1}^{(2)}(s') \cdot \tilde{\beta}_t^{(2)}(s) \cdot \gamma_t^{(2)}(s',s)} = L_c^{2,j}(y_t) + L_a^{2,j}(x_t) + L_e^{2,j}(x_t). \quad (3)$$

Далі розраховується апостеріорне LLR біта даних, вироблене самим декодером, $-L_e^{1,j}(x_t)$:

$$L_e^{1,j}(x_t) = L^{1,j}(x_t) - L_c^{1,j}(y_t) - L_a^{1,j}(x_t). \quad (4)$$

Після перемержувача Π апостеріорне LLR $L_e^{1,i}(x_t)$ перетворюється на апіорне LLR $L_a^{2,j}(x_t)$: $L_a^{2,j}(x_t) = f_1(L_e^{1,i}(x_t))$, де $f_1(\cdot)$ – функція, що здійснює операції перемержування, і подається на декодер 2. Декодер 2 виконує аналогічні обчислення для отримання величини $L_e^{2,i}(x_t)$:

$$L_e^{2,j}(x_t) = L^{2,j}(x_t) - L_c^{2,j}(y_t) - L_a^{2,j}(x_t). \quad (5)$$

Виконавши операцію деперемержування D : $L_a^{1,j+1}(x_t) = f_2(L_e^{2,i}(x_t))$, де $f_2(\cdot)$ – функція, що здійснює операції деперемержування, величина використовується як апіорна для декодера 1 ітерації $j + 1$. Далі здійснюються обчислення, аналогічні (2), (3). Після виконання всіх ітерацій декодування виносяться «жорсткі» рішення про переданий біт: $\tilde{u}_t = \text{sign}[L(u_t)]$.

З урахуванням HARQ основні математичні співвідношення запишуться наступним чином:

Розрахунок LLR біта даних x_t , $t \in \overline{1, N}$, i -м декодером, $i \in \overline{1, 2}$, j -ї ітерації декодування, $j \in \overline{1, I}$, для всіх біт блоку довжиною N , декодера 1 і 2, ітерацій декодування $j \in \overline{1, I}$, де I – загальна кількість ітерацій декодування, h – параметр автоматичних запитів на повторну передачу.

$$L^{i,j,h}(x_t) = \log \frac{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=1}} \tilde{\alpha}_{t-1}^{(i)}(s') \cdot \tilde{\beta}_t^{(i)}(s) \cdot \gamma_t^{(i)}(s',s)}{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=0}} \tilde{\alpha}_{t-1}^{(i)}(s') \cdot \tilde{\beta}_t^{(i)}(s) \cdot \gamma_t^{(i)}(s',s)} =$$

$$\log \frac{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=1}} \tilde{\alpha}_{t-1}^{(i)}(s') \cdot \tilde{\beta}_t^{(i)}(s) \cdot \exp \left[\frac{1}{2} \cdot \left(x_t^{C,h} \cdot \left(L_a^{i,j,h}(x_t^{C,h}) + L_c \cdot y_t^{C,h} \right) + L_c \cdot y_t^{\Pi i,h} x_t^{\Pi i,h} \right) \right]}{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=0}} \tilde{\alpha}_{t-1}^{(i)}(s') \cdot \tilde{\beta}_t^{(i)}(s) \cdot \exp \left[\frac{1}{2} \cdot \left(x_t^{C,h} \cdot \left(L_a^{i,j,h}(x_t^{C,h}) + L_c \cdot y_t^{C,h} \right) + L_c \cdot y_t^{\Pi i,h} x_t^{\Pi i,h} \right) \right]} =$$

$$= L_c^{i,j,h}(y_t) + L_a^{i,j,h}(x_t) + L_e^{i,j,h}(x_t).$$

Розрахунок апостеріорного LLR біта даних x_t , $t \in \overline{1, N}$ i -м декодером, $i \in \overline{1, 2}$, j -й ітерації декодування, $j \in \overline{1, I}$, для всіх бітів блока довжиною N , декодера 1 і 2, ітерацій декодування $j \in \overline{1, I}$:

$$L_e^{i,j,h}(x_t) = L^{i,j,h}(x_t) - L_c^{i,j,h}(y_t) - L_a^{i,j,h}(x_t).$$

Якщо існують помилки в прийнятому блоці довжиною N , формується сигнал HARQ, який передається на декодер для модифікації алгоритму декодування і надходить по каналу зворотного зв'язку для повторної передачі блоку даних. Параметр автоматичних запитів зворотної передачі $h = h + 1$.

3. Формування ознак для MLP.

Для кожного біту u_k створюється feature vector:

$$f_k = [L_e^{(i)}(u_k), |L_e^{(i-1)}(u_k)|, \Delta L_e(u_k), N^{\text{о}} \text{ ітерації, CRC, HARQ}]. \quad (6)$$

– Розраховується $\Delta L_e(u_k) = L_e^{(i)}(u_k) - L_e^{(i-1)}(u_k)$ – зміна ЛВФП на попередній ітерації.

4. Корекція LLR через MLP.

MLP навчається як коригувальна функція, яка перетворює зовнішнє ЛВФП:

$$\tilde{L}_e(u_k) = f_{\theta}(f_k), \quad (7)$$

де:

– f_{θ} – MLP з параметрами θ .

– Вихід: скоригована зовнішня ЛВФП для біта u_k .

MLP має наступну архітектуру: Input \rightarrow Dense64 \rightarrow ReLU \rightarrow Dense32 \rightarrow ReLU \rightarrow Dense1 \rightarrow Identity.

Розглянемо цю архітектуру детальніше.

4.1. Вхідний шар (input).

Нехай вхідний вектор:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in \mathbb{R}^N,$$

де елементами є LLR значення, прийняті з каналу з урахуванням «канальної» надійності.

4.2. Перший повнозв'язний шар (Dense64) (рис. 2).

Вхідний вектор

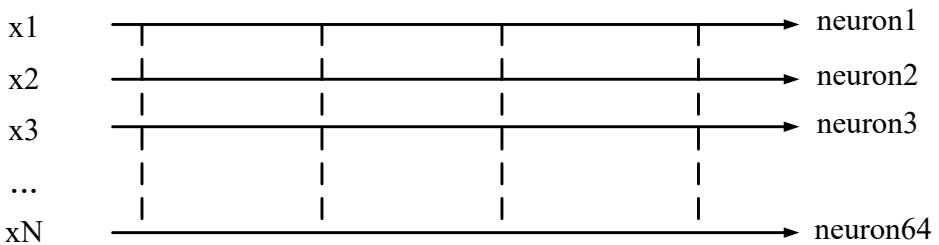


Рис. 2. Перший повнозв'язний шар (Dense64)

Тут відбувається лінійне перетворення:

$$z_1 = W_1 x + b_1,$$

де

$$W_1 \in \mathbb{R}^{64 \times N},$$

$$b_1 \in \mathbb{R}^{64},$$

$$z_1 \in \mathbb{R}^{64}.$$

У цьому виразі W_1 – матриця параметрів, які навчаються під час тренування мережі.

Розмірність:

$$W_1 \in \mathbb{R}^{64 \times N},$$

де N – кількість входів, 64 – кількість нейронів у шарі Dense 64.

Кожен нейрон має свій набір ваг.

Наприклад, для нейрона i :

$$w_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iN}].$$

Ці ваги визначають важливість кожного входу.

Далі, b_1 – вектор зміщення Bias, це додатковий параметр для кожного нейрона.

Розмірність:

$$b_1 \in \mathbb{R}^{64},$$

Тобто

$$b_1 = [b_1^{(1)}, b_1^{(2)}, \dots, b_1^{(64)}].$$

Результат лінійного перетворення z_1 – це вихід лінійної частини шару (до активації).

Розмірність:

$$z_1 \in \mathbb{R}^{64},$$

Обчислення для нейрона i :

$$z_{1,i} = w_{i1}x_1 + w_{i2}x_2 + \dots + w_{iN}x_N + b_i.$$

Тобто, це скалярний добуток входу і ваг плюс bias.

Повнозв'язний (Dense) шар означає, що кожен вхід з'єднаний з кожним нейроном шару. У шарі Dense64 є 64 нейрони.

Шар обчислює 64 таких нейрони одночасно:

$$z_1 = \begin{bmatrix} z_1^{(1)} \\ z_1^{(2)} \\ \dots \\ z_1^{(64)} \end{bmatrix}$$

або

$$z_1 = W_1 x + b_1,$$

де

$$W_1 = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{64,1} & w_{64,2} & \dots & w_{64,N} \end{bmatrix},$$

4.3. Активация ReLU (Rectified Linear Unit – випрямлений лінійний блок).
Функція

$$\text{ReLU}(z) = \max(0, z).$$

Тобто

$$h_1 = \text{ReLU}(z_1)$$

або

$$h_1 = \begin{cases} z_{1i}, & z_{1i} > 0 \\ 0, & z_{1i} < 0 \end{cases},$$

$$h_1 \in \mathbb{R}^{64}.$$

4.4. Другий Dense шар (Dense32) (рис. 3).

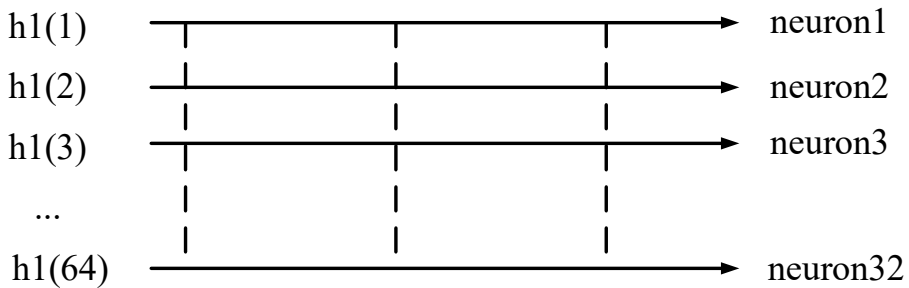


Рис. 3. Другий Dense шар (Dense32)

Використовується наступне лінійне перетворення:
Тут відбувається лінійне перетворення:

$$z_2 = W_2 h_1 + b_2,$$

де

$$W_2 \in \mathbb{R}^{32 \times 64},$$

$$b_2 \in \mathbb{R}^{32},$$

$$z_2 \in \mathbb{R}^{32}.$$

Після шару Dense64 та ReLU отримуємо вектор з 64 значень:

$$h_1 = [h_1^{(1)}, h_1^{(2)}, \dots, h_1^{(64)}].$$

Цей вектор подається на Dense32.

Dense32 – це повнозв’язний шар з 32 нейронами.

Кожний нейрон отримує всі 64 входи.

Матриця ваг має розмір:

$$W_2 \in \mathbb{R}^{32 \times 64}.$$

Тобто, 32 рядки (по одному для кожного нейрона), 64 стовпці (по одному для кожного входу).

$$W_2 = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,64} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & w_{2,64} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{32,1} & w_{32,2} & \dots & w_{32,64} \end{bmatrix}.$$

Вектор bias визначається як:

$$b_2 = [b_2^{(1)}, b_2^{(2)}, \dots, b_2^{(32)}].$$

Шар обчислюється за формулою:

$$z_2 = W_2 h_1 + b_2,$$

Обчислення для нейрона 1:

$$z_2^{(1)} = w_{1,1} h_1^{(1)} + w_{1,2} h_1^{(2)} + \dots + w_{1,64} h_1^{(64)} + b_2^1.$$

4.5. Друга ReLU.

$$h_2 = \text{ReLU}(z_2),$$

$$h_2 \in \mathbb{R}^{32}.$$

4.6. Вихідний Dense шар (Dense1).

Також виконується лінійне перетворення:

$$z_3 = W_3 h_2 + b_3,$$

де

$$W_3 \in \mathbb{R}^{1 \times 64},$$

$$b_3 \in \mathbb{R},$$

$$z_3 \in \mathbb{R}.$$

Dense1 – це повнозв'язний шар з одним нейроном, тобто 32 входи і 1 вихід.

Матриця ваг має розмір:

$$W_3 \in \mathbb{R}^{1 \times 32},$$

$$W_3 = [w_1, w_2, \dots, w_{32}].$$

Таким чином, вихід обчислюється як:

$$z_3 = W_3 h_2 + b_3 = w_1 h_2^{(1)} + w_2 h_2^{(2)} + \dots + w_{32} h_2^{(32)} + b_3.$$

4.7. Лінійний вихід.

Виконується наступне:

$$y = z_3 = W_3 h_2 + b_3.$$

Це важливо для LLR корекції, бо значення можуть бути як додатні, так і від'ємні.

4.8. Повна математична модель MLP:

$$y = W_3 \text{ReLU}(W_2 \text{ReLU}(W_1 x + b_1) + b_2) + b_3.$$

5. Обчислення апостеріорного LLR після корекції:

$$L(u_k) = L_a(u_k) + \tilde{L}_e(u_k), \quad (8)$$

де $L_a(u_k)$ – апіорне LLR (від попереднього декодера); $\tilde{L}_e(u_k)$ – скориговане зовнішнє LLR від MLP.

6. Обмін зовнішніми LLR у турбо декодері.

1) Використовуємо перемешувач (interleaver) або деперемешувач (deinterleaver), щоб передати LLR іншому декодеру турбо коду:

$$L_a^{next}(u_k) = \text{interleaver}(L(u_k)). \quad (9)$$

2) Повторюємо кроки 2–6 для N ітерацій турбо декодування.

7. Підготовка MLP до навчання.

Застосуємо цільову функцію втрат:

$$\mathcal{L} = - \sum_k [u_k \ln \sigma(\tilde{L}_e(u_k)) + (1 - u_k) \ln (1 - \sigma(\tilde{L}_e(u_k)))], \quad (10)$$

де $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ – сигмоїдна функція для переведення LLR у ймовірність.

Метою є скориговані LLR, які відображають правильну ймовірність успіху декодування біта.

Існують три події щодо прийняття рішень при декодуванні декодером d , $d \in \overline{1,2}$ ітерації декодування j , $j \in \overline{1,I}$ біта інформації:

1) Подія A_1 . Зміни знаку в значеннях $L_a^{d,j}(x_t^C)$ і $L_e^{d,j}(x_t^C)$ ітерації j не відбувається ($\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) = \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$), $L(x_t^C) \geq 0$. Виноситься однозначне рішення щодо того, що був переданий біт $x_t^C = 1$.

2) Подія A_2 . Зміни знаку в значеннях $L_a^{d,j}(x_t^C)$ і ітерації j не відбувається ($\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) = \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$), $L(x_t^C) < 0$. Виноситься однозначне рішення щодо того, що був переданий біт $x_t^C = -1$.

3) Подія A_3 . Знак апіорного значення $L_a^{d,j}(x_t^C)$ та знак апостеріорної інформації $L_e^{d,j}(x_t^C)$ ітерації j не дорівнюють нулю ($\text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) \neq \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C))$). У цьому випадку можливі помилки декодування.

Показник якості для d , $d \in \overline{1,2}$ при ітерації j , $j \in \overline{1,I}$ розраховується як:

$$\sum_{d=1}^2 R^{d,j}(t+1) = R^{d,j}(t) + 1,$$

$$\text{якщо } \text{sign}(L_a^{d,j}(x_t^C)) \neq \text{sign}(L_e^{d,j}(x_t^C)), t \in \overline{1,N}.$$

Чим частіше значення показника невизначеності R зростає, тим більше ймовірність появи неправильно декодованих бітів, що негативно впливає на достовірність прийому інформації.

Сумарний показник невизначеності R_Σ визначається як сума показників невизначеності по всіх ітераціях декодування:

$$R_\Sigma = \sum_{j=1}^I R^{d,j}.$$

Для зручності розрахунків та адаптації зробимо нормалізацію показника невизначеності:

$$\tilde{R}_\Sigma = \frac{R_\Sigma}{B \cdot \tilde{N} \cdot I} = \frac{\sum_{j=1}^I R^{d,j}}{B \cdot \tilde{N} \cdot I},$$

де B – кількість блоків даних деякого вікна спостереження, \tilde{N} – змінний розмір блоку даних, I – кількість ітерацій декодування турбо коду.

При параметричній адаптації, виходячи з обчисленого показника невизначеності для декодера d , $d \in \overline{1,2}$ на ітерації декодування j , $j \in \overline{1,I}$, та враховуючи накопичені значення невизначеності по B оброблених блоках даних, виконується адаптивне визначення оптимального розміру діаграми станів відповідного РСЗК.

8. Повний покроковий алгоритм (рис. 4).

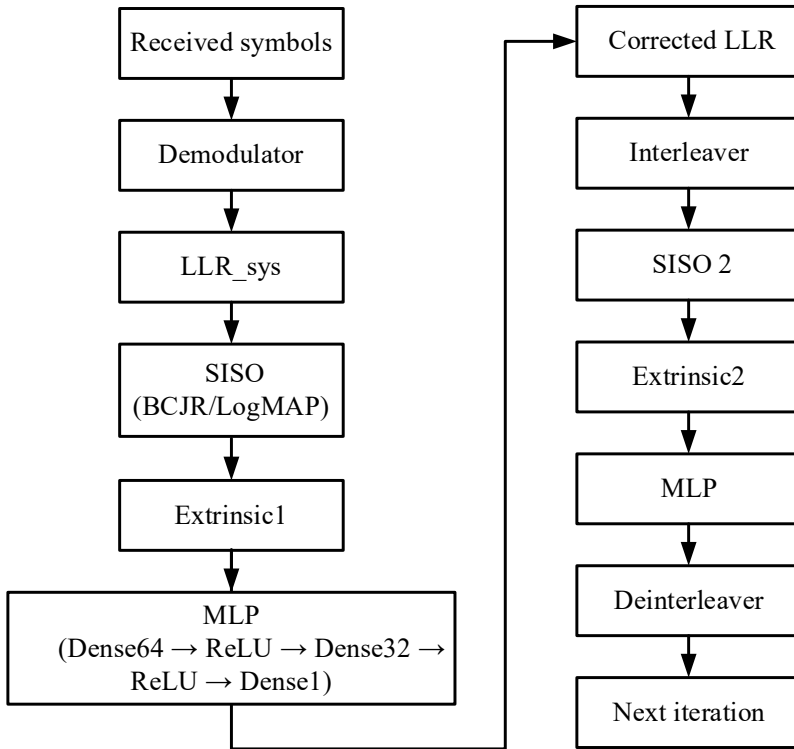


Рис. 4. Повний покроковий алгоритм

- 1) Ініціалізація: $L_a^{(0)} = 0$.
- 2) Для кожного біта u_k обчислити $L_e(u_k)$.
- 3) Створити feature vector f_k .
- 4) Передати f_k у MLP $\rightarrow \tilde{L}_e(u_k)$.
- 5) Обчислити апостеріорний LLR: $L(u_k) = L_a(u_k) + \tilde{L}_e(u_k)$.
- 6) Передати LLR іншому декодеру (interleaver).
- 7) Повторити N ітерацій.

Після останньої ітерації скориговані LLR використовуються для остаточного рішення (hard decision):

$$\hat{u}_k = \begin{cases} 1, & L(u_k) > 0 \\ 0, & L(u_k) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

Висновки

1. Роботу присвячено дослідженню підвищення ефективності функціонування сучасних безпроводних технологій 5G та 6G.

2. В статті представлено метод параметричної адаптації паралельних та послідовних турбо кодів з використанням нейронних мереж типу багаторівневий перцепторон та показника невизначеності декодування.

3. Розглянуто використання нейронних мереж типу багаторівневий перцепторон для коригування зовнішніх логарифмічних відношень функцій правдоподібності ймовірнісних алгоритмів декодування паралельних та послідовних турбо кодів.

4. Запропоновано використання показника невизначеності декодування паралельних та послідовних турбо кодів на етапі навчання при визначенні вагових коефіцієнтів матриці ваг та при функціонуванні нейронних мереж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Aldossari, S. A., Aldosary, A., & Chen, K.-C. (2023). Overcoming wireless channel modelling and relay signal selection via artificial intelligence techniques in 5G and beyond. In *Proceedings of the 14th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)* (pp. 810–815). <https://doi.org/10.1109/ICUFN57995.2023.10200723>
2. Thamilchelvan, R., & Gomathy, C. (2023). Modeling intelligent wireless communication channel for 5G and beyond using advanced machine learning techniques. In *Proceedings of the 5th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)* (pp. 916–920). <https://doi.org/10.1109/ICIRCA57980.2023.10220931>
3. Al-Khafaji, M., & Elwiya, L. (2022). ML/AI empowered 5G and beyond networks. In *Proceedings of the International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/HORA55278.2022.9799813>
4. Olaniyi, K. A., Heymann, R., & Swart, T. G. (2024). Machine learning for channel coding: A paradigm shift from FEC codes. *Journal of Communications*, 19(2), 107–118.
5. Richardson, T. J., Shokrollahi, M. A., & Urbanke, R. L. (2001). Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 47(2), 619–637. <https://doi.org/10.1109/18.910578>
6. Benedetto, S., & Montorsi, G. (1996). *Principles of turbo coding*. Springer.
7. Arikan, E. (2009). Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 55(7), 3051–3073. <https://doi.org/10.1109/TIT.2009.2021379>

Стаття надійшла до редакції 22.12.25, надійшла після рецензування 30.01.26, прийнята 24.02.26

The article was received 22.12.25, received after revision 30.01.26, accepted 24.02.26

Зайцева Лілія Ігорівна

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0668-711X> e-mail: lili5990n@ukr.net

UDC 004.94

Taras Bivoino¹, Senior Lecturer of the Department of Information Technology and Software Engineering

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6914-5441> ResearcherID: B-7478-2017

e-mail: tbivoyno@gmail.com

Dmytro Lysenko¹, Doctor in Technical Sciences, Professor of the Department of Information and Computer Systems

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6870-6120> *e-mail*: lysenko.d@stu.cn.ua

Pavlo Byvoino¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Computer Systems

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8145-8459> ResearcherID: R-7447-2016

e-mail: p.g.byvoino@gmail.com

Nataliia Sokorynska², PhD in Technical Sciences, Deputy Head of the Communications Department of the Administration of the State Special Transport Service, Colonel

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9713-7289> *e-mail*: sokor-nata@ukr.net

¹Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine

²State Special Transport Service, Kyiv, Ukraine

COMBINING OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING AND SIMULATION IN EDUCATION

Abstract. *The article discusses the integration of simulation modeling and object-oriented programming (OOP) in IT education. The authors argue that closed-source commercial tools (Simulink, GPSS, Simio) limit the educational process by hiding the internal system architecture. As a solution, the "Simulation" open-source Java framework, developed at Chernihiv Polytechnic National University, is presented.*

The framework is based on discrete-event simulation and the "active object" concept. The core element is the Actor abstract class, which defines object behavior through the rule() method. Model time management and process synchronization are handled by the Dispatcher class, which utilizes a queue-based system to process events and validate logical conditions via lambda functions.

The educational curriculum is divided into stages: studying random number generators (Uniform, Norm, Erlang), statistical data processing, and building queuing system (QS) models. To analyze simulation results, students employ components such as ExperimentManager for automated factor analysis and TransprocessManager for studying transient processes. Special emphasis is placed on the object-oriented analysis of real-world systems, such as soil extraction logistics.

The study demonstrates that the open-source nature of the "Simulation" framework enables students to explore the internal implementation of complex software, design patterns, and pseudo-parallelism mechanisms. This approach ensures continuity in programming training and enhances the development of professional IT competencies. The project is hosted on GitLab.

Keywords: *simulation modeling, object-oriented programming, Java framework, queuing systems, discrete-event simulation, active objects, IT education.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.225-234>

Relevance of the study. Mastery of simulation tools and the ability to build appropriate models is essential for training developers of modern IT systems, the complexity, dynamism, and scale of which are constantly increasing. Simulation modeling is a research method based on the fact that the system under study is replaced by a simulation model and experiments are conducted with it in order to obtain information about this system without resorting to experiments on a real object. Modeling is widely used in the study of systems of various nature. For IT students, the greatest interest is the simulation modeling of queueing systems (QS) [2], [3]. Developing a simulation model in a programming language “from scratch” is a rather difficult task; however, the models development time for complex systems can be reduced by using existing effective modeling tools.

Target setting. A significant disadvantage of using existing effective modeling tools in the educational process is the lack of access to the source code, which does not allow using them as examples of the large-scale software systems structure and implementation in the training of IT specialists. The ability to solve problems that go beyond the scope of these tools is also a problem. We propose to use an approach in the educational process in which students not only use a closed software product to implement their own models, but also have access to the source code of the package.

Actual scientific researches and issues analysis. For the implementation of modeling, various concepts of formalization and structuring are used, the choice of which significantly depends on the systems under study. MathCad [4] can be used to solve differential equations. Simulink [5] makes the modeling process more understandable and accessible through the use of block diagrams. However, GPSS [6] is better suited for modeling systems consisting of objects interacting in time. A powerful tool is the Simio platform [7], which is used for discrete event modeling with built-in support for both simulation and planning.

Identification of previously unsolved parts of the general problem. While the analyzed tools are efficient for engineering tasks, they are insufficient for comprehensive IT education. The gap in current research and practice is the absence of an educational framework that combines practical simulation modeling with deep immersion into the source code implementation. This limits the formation of essential object-oriented thinking and the understanding of real-world software architecture necessary for modern IT specialists.

The research objective. The objective of this research is to enhance the quality of the IT educational process by ensuring the continuity of programming training and the formation of object-oriented thinking. This is achieved through the development and implementation of an open-source simulation framework in the curriculum, allowing students to study the internal structure and implementation of tools simultaneously with their practical application.

Presentation of the main material. The framework “Simulation” was created at Chernihiv Polytechnic National University to support the educational process in the disciplines “System Modeling” and “Object-Oriented Programming”, which are closely related in the structure of training specialists in computer engineering. This connection is due to the fact that the department consistently implemented the principle of “to acquaint students not only with the use of packages, but also with their internal structure and implementation”. The simulation course was ideally suited for the implementation of this principle, because simulation modeling is organically connected with the object-oriented approach to design and programming.

In accordance with the outlined idea, the developers formulated the following requirements for the framework, which should ensure the solution of the task of mastering the methods and means of simulation modeling in the educational process:

- the ability to create active transactions (which have their own rules of action);
- the ability to delay the execution action rules for a certain time or until the corresponding conditions are met;
- the presence of components that correspond to the main elements of the queueing system model;
- the presence of random variables generating means and statistical data processing;
- the presence of means for automating experiments with the model;
- the presence of special tools for analyzing transient processes;
- the openness of the code.

To implement the requirements, a library of interfaces and classes, including abstract ones, has been developed in the Java programming language. This library is similar in functionality to the Simula language [8, 9]. The library [10] uses the concept of discrete simulation, which assumes that the state of the system can change only at the moments of completion of events, and is based on the description of processes that are focused on transaction processing or simulate the behavior of active transactions.

To model objects that operate in parallel over time, the framework implements the concept of an “active object.” Such an object can be a service device, an agent, or even a transaction provided it exhibits its own behavior over time. To create such objects, the abstract class Actor is used. Subclasses of this class must provide an implementation for the rule() method, which defines the object's logic over time.

The Actor class provides access to methods that provide a delay for some time in the action rules execution, or a delay until the execution of a certain condition, which is described in a lambda function form of the standard BooleanSupplier type. You can also use a combined delay method that provides a delay until the execution of the corresponding condition, but not more than a specified time. The condition and the object's activation time are stored in the corresponding fields of the active object.

Below is an example of the FinishDevice class, which represents objects that complete transaction processing. The action rules include waiting for a transaction to appear in the queue and delaying the transaction processing time.

```
public class FinishDevice extends Actor {
//Simulation duration
private double finishTime;
//Transaction queue
private QueueForTransaction inputQueue;
//Processing time generator
private Randomable rnd;
//Waiting condition
private BooleanSupplier isTransaction = ()-> inputQueue.size()>0;
//Active object action rules
protected void rule() {
//A loop while the duration of the simulation
while (dispatcher.getCurrentTime()<=finishTime) {
waitForCondition(isTransaction, "must be a transaction");
//Removing a transaction from the queue
```

```
queue.removeFirst();  
//Transaction processing delay  
holdForTime(rnd.next());  
}  
}  
}
```

Each active object has access to an object of class Dispatcher. This object is responsible for advancing the model time (currentTime) and for synchronizing the action rules of the active objects. The dispatcher has three queues. The Ready Queue stores active objects that are ready to start executing their action rules. The Condition Queue contains objects that have suspended their action rules until the condition they are storing is met. The Time Queue contains objects that have temporarily suspended their action rules and stores the value of the model time when the action rules need to be resumed.

The dispatcher prioritizes the Ready Queue, activating the first available object and pausing its own execution until the activated object yields control or terminates.

The dispatcher then activates again and, if the Ready Queue is empty, scans the Condition Queue. If the condition for any of these objects is met, the dispatcher activates that object and pauses until the activated object stops.

The Time Queue is viewed by the dispatcher last. The dispatcher selects the object with the shortest activation time from the queue and sets the model time value according to the activation time of this object. In this way, the model time is changed from event to event. After the time is changed, the dispatcher activates the selected object.

Another important class of the framework is the QueueForTransactions class, whose objects are queues for storing transactions. References to an object of the Dispatcher class, an object of the Diagram class (to display queue changes over time), and a DiscretHisto statistics accumulator can be passed to objects of this class. In this case, the queue will display changes in its state over time on a chart and accumulate statistics about changes in its size.

A variant of such a queue is the Store class, whose objects accumulate their size as a real number, but can also be associated with a statistics accumulator and a chart.

A simulation model building. The framework offers a certain protocol for creating a simulation model. According to this protocol, the model must have a constructor through which a reference to an object of the Dispatcher class is passed and a reference to an object from which the model can obtain settings for its components. Such an object can be, for example, a graphical user interface that provides the ability to configure model parameters and provide access to them. This is the solution presented in Fig. 3, 4, 5, where the QS parameters panel is used to configure the model parameters. The user initiates the modeling process using the Start button. As a result, an object of the Dispatcher class is created. After that, the model is created either directly by the constructor or by the model factory.

The constructor call should ensure the creation and configuration of the model itself and all its components, that are required at the time of start. The model constructor must also ensure the loading of active objects into the dispatcher's Ready Queue through the appropriate method. After the model is created, the modeling process is initiated by calling the dispatcher's start method.

The process of creating a model is discussed in more detail a little later.

The framework includes various classes of random number generators, classes for accumulating statistical data, processing accumulated data, and testing statistical hypotheses.

The visual components of the framework help create an application graphical interface for conducting model experiments. In particular, these are visual components for selecting and configuring random number generators, elements for input/output of data with simultaneous conversion, and diagrams for displaying graphs and histograms.

The ExperimentManager component provides automation of conducting a series of single-factor experiments with a model at one or many levels, as well as variance and regression analysis of the obtained results.

The TransprocessManager component allows you to conduct experiments on parameter estimation and viewing transient processes in the model queues.

The StatisticsManager component allows you to organize the collection of statistical information about the model's operation and convenient viewing of statistical data.

GitLab provides access to the framework via the link [10].

Practical tasks overview. Random number generation. At this stage, first, methods for obtaining uniformly distributed random numbers and their testing are investigated.

Then, methods for creating random number generators for other distribution laws are considered, in particular, uniform (Uniform class), normal (Norm class), triangular (Triangular class), exponential (Negexp class), Erlang (Erlang class), discrete (Discret class) and arbitrary (Linear class). The concept of a “random flow of events” is also investigated.

As practical work, researchers create an application using the tools of the Simulation framework, Fig. 1. This application allows studying the influence of distribution law parameters on the probability density function and the integral distribution function.

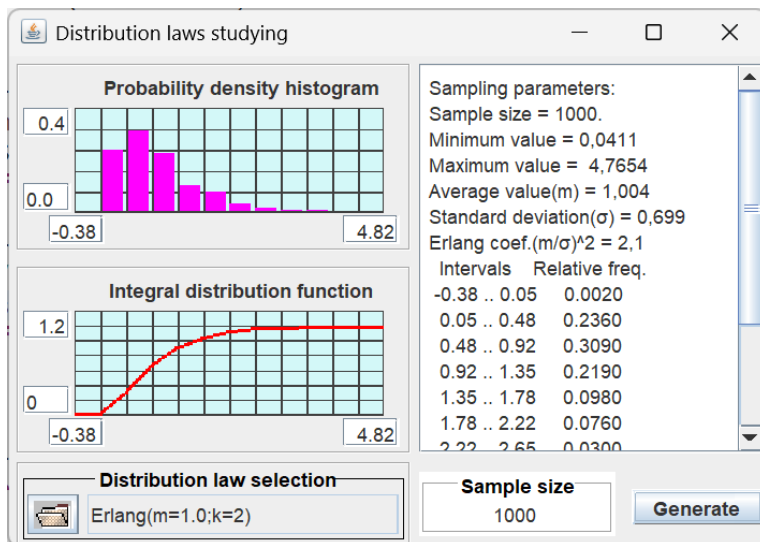


Fig. 1. Application for studying distribution laws

Source: Developed by the authors

Statistical data processing and statistical hypothesis testing. In the bounds of performing this task, statistical processing of the provided samples of numerical data, which are located in text files, is carried out. To implement the task, an application is used that allows you to view the data sample, calculate the main statistical characteristics and test statistical hypotheses about the compliance of the data with the selected distribution law. Fig. 2 shows the results of testing the random number sample and testing the statistical hypothesis for compliance with the selected law.

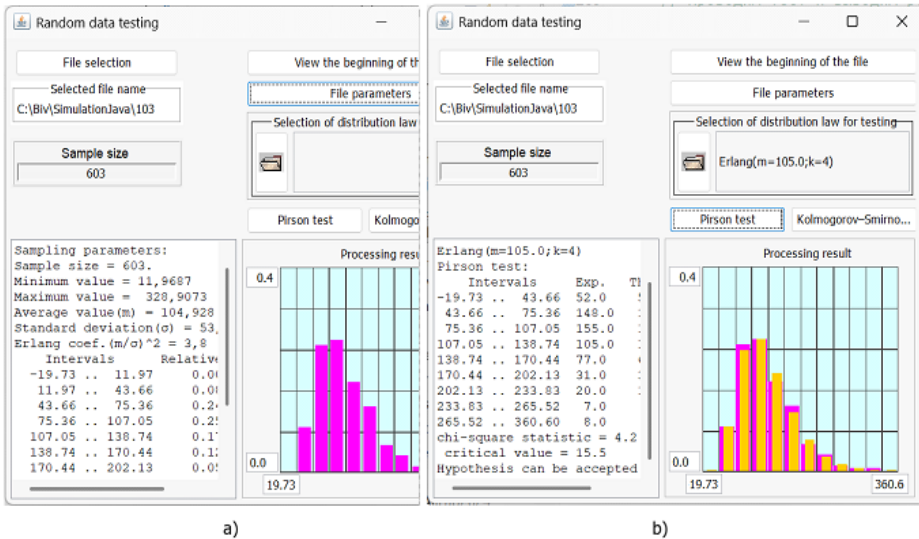


Fig. 2. Processing a sample of random numbers (a – parameters calculation, b – statistical hypothesis testing)

Source: Developed by the authors

Development of a queuing system simulation model and its research. At this stage, individual tasks are performed to develop and study simulation models for queuing system related to various subject areas. As an example, an object-oriented analysis of soil extraction and transportation works is proposed. The queuing system proposed for modeling includes a bulldozer, a loader, a team of dump trucks and a pile of soil formed by the bulldozer. In the process of completing an individual task, the following steps must be implemented:

- conduct an object-oriented analysis of the system and form a list of objects that will be included in the model;
- determine the list of indicators that characterize the operation of the system, and methods for experimentally determining these characteristics in the modeling process;
- create a simulation model of the system using the tools of the Simulation framework, and program the behavior of active system objects;
- develop a visual application that will allow you to configure model parameters and view the results of statistical processing of modeling results. To simplify this task, the StatisticsManager component is used.

As an example of a software implementation, let's consider an application that models a simple Markov QS. Fig. 3 shows the results of this application.

The active components of the model are represented by the Generator and Device classes, which inherit the Actor class and implement their rule() methods, which are

similar to the rule() method of the FinishDevice class, which was previously considered. The transaction queue is represented by an object of the QueueForTransactions class. The transactions themselves were modeled by objects of the Double class, which contained the time when the transaction was included in the queue. As a storage of statistical data about the queue length, an object of the DiscretHiso class was connected to the QueueForTransactions class object. To accumulate information about the transactions waiting time in the queue, an object of the Hiso class was connected to the Device class object. Another such object was used to accumulate the waiting time of the Device class object.

Lazy instantiation and initialization methods were used to create model objects. When the object was first accessed, the model created this object and initialized it using a reference to the visual part.

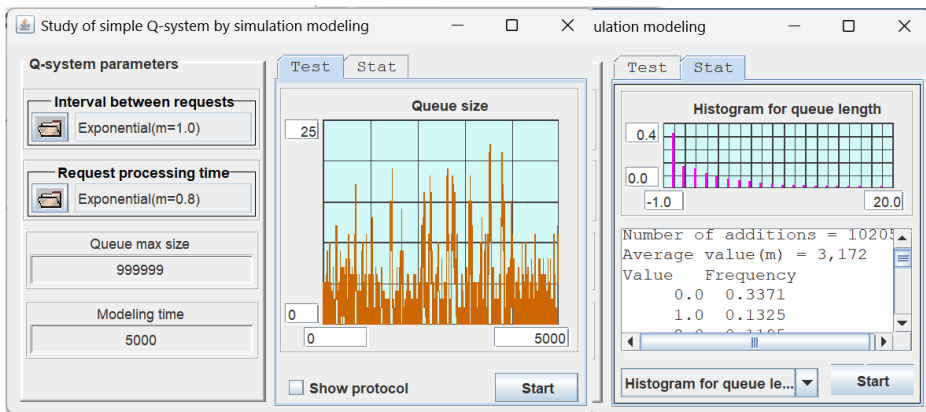


Fig. 3. Application for studying a simple Markov queueing system
 Source: Developed by the authors

Automation of single-factor experiments with simulation models. The next stage of practical work is planning and conducting a series of single-factor experiments with the model at one or many levels in order to study the influence of this factor on the results of the system. To implement this task, the ExperimentManager component is provided, to which the own model is connected, by implementing a specific interface for communication between the component and the model.

As an example, an application is considered in which the ExperimentManager works with the model, which was developed at the previous stage. Fig. 4 shows the appearance of this application with an open panel for conducting experiments, which is configured to study the influence of the system load factor on the performance of the system.

The ExperimentManager component not only automates the conduct of a series of experiments with the model, but also provides the ability to conduct variance and regression analysis of the experiments results, as evidenced by Fig. 4.

Study of transient processes in queueing systems queues. At the final stage of practical work, transient processes in the SMO are investigated. For this, the TransprocessManager component is used. The average queue length is used as an indicator that characterizes the state of the system in time. In order to identify patterns that are characteristic of the transient process, the component uses a factory

to create many instances of the model that operate in a single time space. During the operation of these models, the component averages the queue length in time at accumulation intervals and across all implementations. Fig. 5 shows the results of using the TransprocessManager component to analyze the transient process in the queue of a simple queuing system.

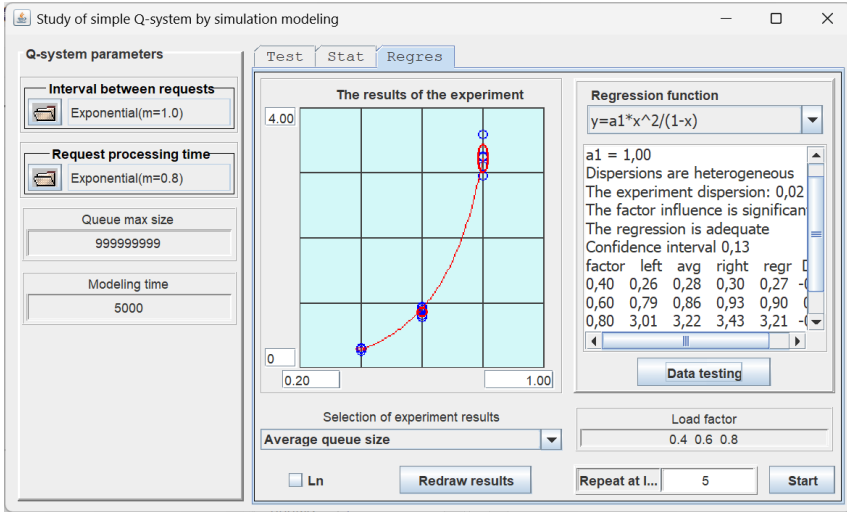


Fig. 4. Results of a series of experiments with a simple QS model and regression analysis of these results

Source: Developed by the authors

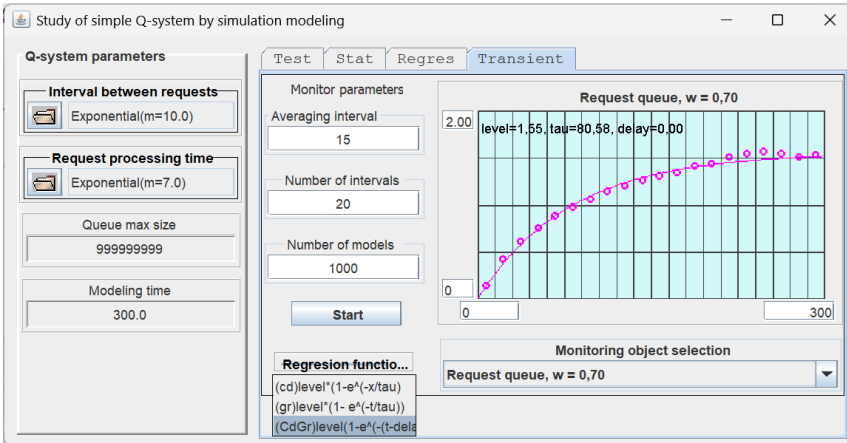


Fig. 5. Results of the transition process study in a simple queuing system

Source: Developed by the authors

Methodological support. While solving practical problems, researchers can use methodological guidelines for developing a simulation model [11] and a study guide on developing simulation models in the Java programming language [12]. Development examples are provided in a software package containing an open-source implementation of the cases discussed. The software package is provided as a .zip file that can be imported into the Eclipse IDE for code examination. Access to the application is provided via GitLab at the link [13].

Conclusion. The proposed organization of the "Systems Modeling" course successfully integrates simulation modeling with advanced OOP principles. The practical implementation of this approach is centered around the Simulation framework, which was developed to bridge the gap between theoretical models and software engineering.

The effectiveness of the framework is demonstrated through its application in students' training projects. Key outcomes of this integration include:

– Deepened OOP Understanding: Students gain practical mastery of core OOP concepts. The framework explicitly showcases polymorphism through class inheritance (e.g., in random number generators) and interfaces (e.g., connecting universal experiment components). The Actor class serves as a practical example of implementing polymorphism via abstract classes.

– Practical Mastery of Design Patterns: Students actively use patterns such as Observer and the Factory design pattern for the dynamic creation and management of models during experiments. – Versatility and Scalability: The framework has proven its versatility across 35 diverse assignment types in fields such as logistics, computer networks, banking, retail, and military science. These models effectively manage between 1 and 5 interacting queues.

– Advanced Features & Collaborative Development: The approach extends to complex topics like real parallelism using thread pools and synchronization mechanisms for multi-level experiments. The open-source nature on GitLab [див. список літератури] fosters student contribution to the modernization of the core code.

We invite readers and the academic community to cooperate in the further improvement of this framework.

REFERENCES

1. Law, A. M. (2014). *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill Higher Education.
2. Gross, D., Harris, C. M., Shortle, J. F., & Thompson, J. M. (2018). *Fundamentals of queueing theory* (5th ed.). Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons.
3. *Basic queueing theory*. (n.d.). yzr95924.github.io.
4. *User's guide Mathcad® 15.0 M010*. (2011). lmal.zut.edu.pl.
5. Dabney, J. B., & Harman, T. L. (2004). *Mastering Simulink*. Prentice Hall.
6. Schriber, T. J. (1991). *An introduction to simulation using GPSS/H* (2nd ed.). Wiley.
7. Simio. (n.d.). *Digital twin simulation software*. www.simio.com.
8. Dahl, O. J., & Nygaard, K. (1967). *SIMULA - A language for programming and description of discrete event systems: Introduction and user's manual*. NCC.
9. Pooley, R. (2018). *An introduction to programming in Simula*. portablesimula.github.io
10. *SimulationFramework*. (Version 23) [Software]. (2023). GitLab. gitlab.com.
11. *System modeling: Methodological guidelines for performing calculation and graphic work for higher education students in the educational program "Computer Engineering"*. (2024). [Modeliuvannia system: Metodychni vkazivky do vykonannia rozrakhunkovo-hrafichnoi roboty dlia zdobuvachiv vyshchoi osvity osvitnoi prohramy "Kompiuterna inzheneriia"]. Chernihiv National University of Technology. ir.stu.cn.ua.
12. Byvoino, P. H., Byvoino, T. P., & Pavlovskiy, V. I. (2025). *Development of simulation models in the Java programming language: A study guide for higher education students in "Computer Engineering"* [Rozrobka imitatsiinykh modelei na movi prohramuvannia Java: Navch. posib. dlia zdobuvachiv vyshch. osvity spets. 123 "Kompiuterna inzheneriia"]. Chernihiv National University "Chernihiv Polytechnic". ir.stu.cn.ua.
13. *SimulationAllLab*. [Software]. (2024). GitLab. gitlab.com.

The article was received 09.01.26, received after revision 02.02.26, accepted 27.02.26

Т. Бивойно, Д. Лисенко, П. Бивойно, Н. Сокоринська ПОЄДНАННЯ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОГРАМУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ В ОСВІТІ

Анотація. У статті розглянуто інтеграцію імітаційного моделювання та об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) в ІТ-освіті. Автори стверджують, що комерційні інструменти із закритим вихідним кодом (Simulink, GPSS, Simio) обмежують освітній процес, приховуючи внутрішню архітектуру системи. Як рішення представлено Java-фреймворк «Simulation» з відкритим вихідним кодом, розроблений у Національному університеті «Чернігівська політехніка».

Фреймворк базується на дискретно-подієвому моделюванні та концепції «активного об'єкта». Основним елементом є абстрактний клас Actor, який визначає поведінку об'єкта через метод rule(). Управління модельним часом та синхронізація процесів здійснюються класом Dispatcher, який використовує систему черг для обробки подій та перевірки логічних умов за допомогою лямбда-функцій.

Навчальна програма розділена на етапи: вивчення генераторів випадкових чисел (рівномірний, нормальний, Ерланга), статистична обробка даних та побудова моделей систем масового обслуговування (СМО). Для аналізу результатів моделювання студенти використовують такі компоненти, як ExperimentManager для автоматизованого факторного аналізу та TransprocessManager для вивчення перехідних процесів. Особлива увага приділяється об'єктно-орієнтованому аналізу реальних систем, наприклад, логістиці видобутку ґрунту.

Дослідження демонструє, що відкритий вихідний код фреймворку «Simulation» дозволяє студентам досліджувати внутрішню реалізацію складного програмного забезпечення, патерни проектування та механізми псевдопаралелізму. Такий підхід забезпечує безперервність навчання програмуванню та сприяє розвитку професійних ІТ-компетенцій. Проект розміщено на GitHub.

Ключові слова: імітаційне моделювання, об'єктно-орієнтоване програмування, Java-фреймворк, системи масового обслуговування, дискретно-подієве моделювання, активні об'єкти, ІТ-освіта.

Стаття надійшла до редакції 09.01.26, надійшла після рецензування 02.02.26, прийнята 27.02.26

Бивойно Тарас

старший викладач кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії, Національний університет «Чернігівська політехніка» (м. Чернігів, Україна)
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6914-5441> ResearcherID: B-7478-2017
e-mail: tbivoyno@gmail.com

Лисенко Дмитро

доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, Національний університет «Чернігівська політехніка» (м. Чернігів, Україна)
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6870-6120> **e-mail:** lysenko.d@stu.cn.ua

Бивойно Павло

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, Національний університет «Чернігівська політехніка» (м. Чернігів, Україна)
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8145-8459> ResearcherID: R-7447-2016
e-mail: p.g.byvoينو@gmail.com

Сокоринська Наталія

доктор філософії, заступник начальника управління комунікацій Адміністрації Державної спеціальної служби транспорту, полковник (м. Київ, Україна)
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9713-7289> **e-mail:** sokor-nata@ukr.net

© 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

**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 16.03.26. Формат 70x108/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 20.65
Обл.-вид. арк. 15.38
Замовлення № _____

Тираж 300 примірників

КИЇВ 2026