

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 55

2025

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

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

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Збірник наукових праць

Випуск 3 (55), липень – вересень 2025 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 3 (55), July – September 2025

Founded in 2008
The journal is published 4 times a year

КИЇВ 2025

KYIV 2025

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:

О.С. ВОЛОШКІНА, д-р техн. наук, проф.

Н. КАСАГЛІ, проф., Італія

Н. МАРГВЕЛАШВІЛІ, PhD, Австралія

ВИКОНАВЧИЙ РЕДАКТОР:

Ю.І. КАЛЮХ, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

В.О. ВАСЯНИН, д-р техн. наук

О.А. ВЛАДИМИРСЬКИЙ, д-р техн. наук

О.М. ГУНЧЕНКО, канд. техн. наук

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

В.Б. ЄГОРОВ, д-р техн. наук

С.В. ЗАЙЦЕВ, д-р техн. наук, проф.

О.В. КОПІЙКА, д-р техн. наук, проф.

Г.М. КОЧЕТОВ, д-р техн. наук, проф.

Т.І. КРИВОМАЗ, д-р техн. наук, проф.

О.Є. КРУЖИЛКО, д-р техн. наук

О.Г. ЛЕБІДЬ, д-р техн. наук

М.Л. МИРОНЦОВ, д-р техн. наук

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

Т.О. НЕГРІЙ, канд. техн. наук

О.В. НЕСТЕРЕНКО, д-р техн. наук

С.В. СУКАЧ, д-р техн. наук, проф.

О.М. ТЕРЕНТЬЄВ, д-р техн. наук

О.М. ТИХЕНКО, д-р техн. наук, проф.

Т.М. ТКАЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.

В.М. ТРИСНЮК, д-р техн. наук

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

В.Ф. ФРОЛОВ, д-р техн. наук, проф.

Д.І. ЧЕРНІЙ, д-р техн. наук

С.Й. ШАМАНСЬКИЙ, д-р техн. наук

Є.О. ЯКОВЛЄВ, д-р техн. наук

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА

М.-Й. ВАЛЕРІ, проф., Польща

М. ЖЕЛЕЗНЯК, канд. техн. наук, проф.,
Фукусіма, Японія

Д. МІНТЕР, проф., Великобританія

А. МІШО, дослідник, Франція

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

Я. ПЕКУТІН, проф., Польща

ПІНГ ЛІУ, проф., Китай

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол № 14 від 25.09.2025)

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

ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА

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

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ

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

Свідцтво про державну реєстрацію
КВ № 14146-3117 Р від 27.05.2008 р.

Ідентифікатор R30-2590 в реєстрі суб'єктів
в сфері друкованих медіа (Рішення № 223,
Протокол № 4 від 01.02.2024 р. Національної
ради України з питань телебачення і
радіомовлення).



Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

ЗМІСТ

До 70-річчя члена-кореспондента НАН України Трофимчука Олександра Миколайовича	5
---	---

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Trofymchuk O., Vasyanin V. A two-step problem of optimizing the structure and routing of flows in a hierarchical multicommodity network.....	8
Трофимчук О.М., Бідюк П.І., Терентьєв О.М., Просянкіна-Жарова Т.І. Математичне моделювання, інтелектуальний аналіз даних та штучний інтелект для підтримки прийняття рішень з повоєнного відновлення....	33
Kaliukh Iu., Shokarev A., Kurash S. Applying modern construction 4.0 technology to damaged buildings.....	50
Сорокін М.В., Железняк М.И., Ківва С.Л., Пилипенко О.І. Паралельне двовимірне моделювання транспорту наносів і забруднюючих речовин в річках на багатопроцесорних системах і графічних процесорах.....	61
Шундель О.І., Федосєнков С.Г., Неверова С.І., Сперанська Н.А. Розробка програмного забезпечення для автоматизованого формування геопросторових <i>GeoTIFF</i> -даних гідроакустичних ехограм для модуля банку океанографічних даних НАН України.....	76
Охарєв В.О., Підсадний С.Г. Геоінформаційна технологія моніторингу динаміки структури землекористування на основі аналізу супутникових зображень.....	87
Василенко В.М., Триснюк Т.В., Берчун Я.О. Інформаційна технологія пасивної локації динамічних подій у прикордонній смузі.....	97
Костюк А.Ю., Зайцев С.В., Василенко В.М., Зайцева Л.І. Методи та стратегії UX-дослідження в розробці інтерактивних інтерфейсів.....	108
Дзюба В.А. Застосування згорткових нейронних мереж для підвищення точності багатопозиційної локалізації джерел радіовипромінювання.....	116

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Цапко Ю.В., Цапко О.Ю. Зниження рівня токсичності продуктів горіння деревини під час евакуації людей.....	123
Ковров О.С., Кулікова Д.В. Дослідження зв'язку між гідрохімічними показниками річки Самара та станом здоров'я населення.....	139
Шумбар К.В., Ткаченко Т.М. Акустична ефективність зелених фасадів: оцінка впливу <i>Parthenocissus quinquefolia</i> на зменшення шумового забруднення.....	153
Кожевніков С.В., Березницька Ю.О. Сталий підхід до проектування віконних профілів для зменшення впливу на довкілля.....	163
Жицька Л.І., Єгорова О.В., Хоменко О.М., Бондаренко Ю.Г. Оцінка впливу хімічного забруднення атмосфери на формування канцерогенних і неканцерогенних ризиків для здоров'я населення міст Черкаської області...	177
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	191

CONTENTS

To the 70th Anniversary of Corresponding Member of the NAS of Ukraine Oleksandr Mykolayovych Trofymchuk	5
--	----------

INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

Trofymchuk O., Vasyanin V. A two-step problem of optimizing the structure and routing of flows in a hierarchical multicommodity network.....	8
Trofymchuk O., Bidyuk P., Terentiev O., Prosyankina-Zharova T. Mathematical modeling, intelligent data analysis and artificial intelligence to support decision-making in post-war reconstruction.....	33
Kaliukh Iu., Shokarev A., Kurash S. Applying modern construction 4.0 technology to damaged buildings.....	50
Sorokin M., Zheleznyak M., Kivva S., Pylypenko O. Parallel modeling of sediment and radionuclide transport in rivers on multiprocessor systems and graphics processors.....	61
Shundel O., Fedoseienkov S., Nevierova S., Speranska N. Development of software for automated generation of geospatial <i>GeoTIFF</i> data of hydroacoustic echograms for the module of the oceanographic data bank of the National Academy of Sciences of Ukraine.....	76
Okhariev V., Pidsadnii S. Geoinformation technology for land use dynamics monitoring based on the analysis of satellite images.....	87
Vasylenko V., Trysnyuk T., Berchun Ya. Information technology for passive location of dynamic events in the border zone.....	97
Kostiuk A., Zaitsev S., Vasylenko V., Zaitseva L. UX research methods and strategies in the development of interactive interfaces.....	108
Dziuba V. Application of convolutional neural networks for improving the accuracy of multistatic localization of radio emission sources.....	116

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Tsapko Yu., Tsapko A. Reducing the toxicity level of wood burning products during evacuation of people.....	123
Kovrov O., Kulikova D. Investigation of the correlation between hydrochemical parameters of samara river and population health.....	139
Shumbar K., Tkachenko T. Acoustic efficiency of green facades: evaluation of the impact of <i>Parthenocissus quinquefolia</i> on noise pollution reduction....	153
Kozhevnikov S., Bereznitska Yu. Sustainable approach to designing window profiles to reduce environmental impact.....	163
Zhytska L., Yehorova O., Khomenko O., Bondarenko Yu. Assessment of the impact of chemical pollution of the atmosphere on the formation of carcinogenic and non-carcinogenic risks for the health of the city population of Cherkask region.....	177
INFORMATION FOR AUTHORS.....	191

НАШ ЮВІЛЯР

До 70-річчя члена-кореспондента НАН України Трофимчука Олександра Миколайовича

01 вересня 1955 року народився видатний український вчений, спеціаліст в галузі інформатики, геомеханіки та геоекології, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, лауреат Державної премії України в галузі освіти, лауреат премії НАН України ім. В.С. Михалевича, кавалер ордена «За заслуги» III ступеня, член-кореспондент НАН України Олександр Миколайович Трофимчук.



Олександр Миколайович в 1980 р. закінчив аспірантуру Інституту гідромеханіки НАН України, де працював до 1998 р. У 1998-2003 рр. був заступником директора з наукової роботи, в.о. директора Українського інституту досліджень навколишнього середовища і ресурсів при РНБО України. З 2004 р. – заступник директора з наукової роботи, а з 2016 р. – директор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України.

Предметом наукових досліджень Олександра Трофимчука є інформатика, геомеханіка, екологічна безпека. Він розробив підходи до розв'язання наукових проблем, що мають велике теоретичне і практичне значення. Створив динамічні моделі та методи розв'язання задач сейсмостійкості споруд з урахуванням їхньої взаємодії зі складними ґрунтовими основами. Розробив математичні моделі насичених пористих середовищ і на їх основі теоретично та експериментально встановив закономірності поширення хвиль у цих середовищах, дослідив явища дилатансії і розрідження ґрунтів.

Олександр Миколайович заклав базис нового напрямку використання географічних інформаційних систем (ГІС) та дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) в геоекології, при аналізі природно-ресурсного потенціалу, оптимізації забруднення поверхневих вод, ґрунтів та атмосфери, прогнозуванні геофізичних подій, зокрема геологічних та екологічних аспектів зниження зсувонебезпеки. Запропонував методи проектування інформаційних систем підтримки прийняття рішень (СППР) – ефективного інструменту для прогнозування фінансово-економічних процесів, екологічного стану територій, зокрема на основі структурно-параметричної адаптації моделей. Розробив інформаційно-аналітичні системи оцінювання економічних ситуацій, в системах аналізу даних застосовував мережі Байєса. Розробив інформаційну технологію моделювання та проектування багатопродуктових

комунікаційних мереж з дискретними потоками, що включає понятійний базис, концепції, принципи, математичні моделі, теоретичні методи, алгоритми, технології, методики, схеми і сценарії, націлені на адаптивне використання ресурсного потенціалу мереж при заданих обмеженнях.

З 2015 року О.М. Трофимчук здійснює науково-технічні розробки в секторі безпеки і оборони України. Під керівництвом О.М. Трофимчука створено програмно-технологічний комплекс виявлення суден – порушників встановленого режиму плавання в морських акваторіях України, який активно використовується під час вирішення бойових завдань.

Значимі науково-практичні результати О.М. Трофимчука були реалізовані в процесі керування ним великими міжнародними проєктами розвитку управління навколишнім середовищем в Україні (Канада, США, Японія, європейські проєкти INTAS, TEMPUS).

Під керуванням О.М. Трофимчука створені і впроваджені автоматизована інформаційна система «Єдиний державний реєстр фізичних та юридичних осіб-підприємців», система інформаційно-аналітичного забезпечення та раціонального природокористування (в 12 обласних державних адміністраціях України), інтелектуальна автоматизована інформаційно-аналітична система супроводження бюджетного процесу (Комітет з питань бюджету Верховної Ради України).

Розробки О.М. Трофимчука знайшли впровадження в будівництві, зокрема, при аналізі динаміки об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС, атомних електростанцій Хурагуа (Куба), Белене (Болгарія), при проєктуванні морських гравітаційних платформ, гідротехнічних споруд, складанні природоохоронних карт і атласів областей України. З метою наповнення і верифікації інформаційних баз даних в ІТГП НАНУ з 2008 року регулярно проводяться екологічні експедиції природно-заповідних територій, водних об'єктів, сміттєзвалищ тощо, керівником і постійним учасником яких є О.М. Трофимчук.

Наукові результати О.М. Трофимчука відображено у 610 працях, зокрема у 36 монографіях. Він веде велику педагогічну роботу. Створив визнану вітчизняною та світовою науковою спільнотою наукову школу з інформаційних технологій та математичного моделювання в геоекології, підготував **33 фахівців вищої кваліфікації: 14 докторів, 17 кандидатів наук та 2 доктора філософії**, нині керує роботою цілої низки аспірантів і докторантів. В цілому, враховуючи учнів у підготовлених О.М. Трофимчуком докторів наук, наукова орбіта О.М. Трофимчука складає 53 доктора і кандидата наук.

З 2002 року – професор Київського національного університету будівництва і архітектури за сумісництвом.

О.М. Трофимчук є членом секції раціонального природокористування Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки, Національного Комітету України з теоретичної і прикладної механіки, є членом правління в Міжнародному консорціумі зі зсувів, членом Науково-консультативної ради міжнародного товариства з геонаук та її Наукового комітету SWS Earth & Planetary Sciences (EPS).

О.М. Трофимчук – голова Вченої ради інституту, голова Спеціалізованої вченої ради інституту № Д26.255.01 із захисту докторських дисертацій за спеціальностями «Інформаційні технології» та «Математичне моделювання і

чисельні методи», головний редактор збірника наукових праць «Екологічна безпека та природокористування», член редколегії міжнародного журналу «Проблеми керування та інформатики», головний редактор збірників праць міжнародної конференції «International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management (SGEM) (2021-2023)», які проіндексовані в Scopus.

В лютому 2024 року за свідому громадянську позицію та надану підтримку, які наближають нашу спільну перемогу, отримав Подяку Управління розвідки Державної прикордонної служби України, а в 2025 році – подяки від Сил підтримки Збройних Сил України і ГУР України.

Внесок О.М. Трофимчука у зміцнення науково-технічного потенціалу держави є вагомим і стратегічно важливим, який засвідчує не лише високий рівень науковця й організатора, але й особисту відданість національним інтересам та майбутньому України.

Колектив інституту, колеги та учні висловлюють щиру вдячність за плідну працю, самовідданість і мудре керівництво і бажають Олександрові Миколайовичу міцного здоров'я, невичерпної енергії, нових наукових і творчих досягнень, а також подальших успіхів у керівній діяльності на благо Інституту та української науки.

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

UDC 519.854.2

Oleksandr Trofymchuk, Corresponding Member of the NASU, D. S. (Computer science), Professor, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** itgis@nas.gov.ua

Volodymyr Vasyanin, D. S. (Computer science), Head of department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4046-5243> **e-mail:** archukr@meta.ua

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

A TWO-STEP PROBLEM OF OPTIMIZING THE STRUCTURE AND ROUTING OF FLOWS IN A HIERARCHICAL MULTICOMMODITY NETWORK

Abstract. *The paper discusses the methodology of mathematical modeling of the two-stage problem of optimization of the backbone hierarchical communication network with multicommodity discrete flows and parameters. The methodology is based on the sequential solution of the problem of optimizing the network structure and the problem of distribution and routing of discrete correspondence flows. As a rule, such networks consist of a decentralized backbone network and fragmented networks in the internal service areas of the backbone nodes. There are four types of network nodes and three levels of its hierarchy. In a multicommodity network, each node can exchange correspondence (products, goods, cargo, messages) with other nodes. Correspondence is characterized by a source node, a drain node and a value, which for transport networks is given by the number of packaged goods, cargo in a package of a unified size, and for data transmission networks – by the number of bytes, kilobytes, etc. In the transport backbone network, all correspondence is first sorted by destination addresses, packed in transport blocks (containers), and then transported in vehicles along the transport highways. In data networks, correspondence is also sorted by destination addresses (multiplexed), packaged in virtual transport blocks, and then transmitted over trunk communication channels. The size (capacity, volume) of the transport block is set by the parameter, and is determined by the number of units of correspondence that fit into it. Mathematical models of problems of optimization of network structure, distribution and routing of flows, and an example of numerical modeling of solving problems on a transport network containing 120 nodes and 300 unoriented arcs are presented. Experimental studies have shown high computational efficiency of the proposed algorithms and programs, and they can be recommended for the practical solution of problems of optimizing the processes of processing and transporting flows in communication networks of large dimensions.*

Keywords: multicommodity hierarchical networks, discrete flows, problems of combinatorial optimization, mathematical models, computer modeling.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.8-32>

Introduction

As a rule, existing and projected communication networks have a hierarchical structure and consist of a decentralized backbone network and networks in the internal service areas of the backbone nodes (internal networks). One of the most important tasks included in the mathematical support of the information-analytical system (IAS) for managing the processes of processing and distribution of discrete flows in a multi-product hierarchical network is forecasting and optimizing the phased development of its infrastructure. At the same time, it is necessary to take into account all the possibilities of high-quality organizational and technical improvement of the network in the presence of restrictions on capital investments (investments) and the possibility of their development. In fact, the solution of these tasks determines the plans for the commissioning of production facilities and fixed assets of network elements (nodal enterprises and communication lines – nodes and routes of vehicles in the transport network, nodes and communication channels in the data transmission network) and labor resources by stages of development. As a rule, long-term development plans are built for several years (from three to ten), and one year acts as a planning stage (planning time discrete). The results of solving such large-aggregated problems – the distribution of capital investments and other material resources by stages of implementation – should be used in the construction of more detailed models at each stage. So, for example, for transport networks, it is necessary to divide the entire amount of capital investments of the stage into the purchase, modernization and commissioning of sorting equipment (cargo sorting lines), equipment for loading and unloading goods in junction enterprises, vehicles for existing and new transportation routes. For data transmission networks, it is necessary to divide the financial resources of the stage into modernization and re-equipment between nodes (multiplexers, switches, routers, etc.) and communication channels.

In each specific case, the choice of the duration of the stage of prospective forecasting is an independent task and depends on the speed of introduction and development of new equipment and information technologies in the network infrastructures of various industries in the economic sphere. The stability of the functioning of network structures during the planning stages in case of load fluctuations in network nodes and communication lines, the occurrence of failures and the action of random factors should be ensured by the tasks of operational management. An extensive bibliographic overview of mathematical models, methods, and algorithms for solving Multicommodity Network Flow Problems (MCNF) can be found in [1-8]. One of the few papers [9] considers the problem of routing groupage packaged cargo in a multi-product network, in which the processes of their sorting and transportation are integrated and restrictions on the time of delivery of goods are taken into account. At the same time, only such cargoes are grouped into one transport block, in which the points of departure and destination and time windows of delivery coincide, restrictions on the capacity of nodes and arcs of the network are not taken into account. [10, 11] presents multi-product routing models with constraints on the bandwidth of network arcs and with hard (the Hard Transit Time-Constrained, HTC-MCNF) and soft (the Soft Transit Time-Constrained, STC-MCNF) constraints on the delivery time of goods, but cargoes with different destination addresses are not combined into common transport blocks.

Unlike most existing approaches to modeling and analyzing the functioning of multi-product networks, this paper considers discrete models of transport processes with integer variables and parameters. Practical tasks should take into account the processes of sorting goods in sorting centers, restrictions on the time of their delivery to the consumer, fluctuations in flows and loads in individual nodes and communication lines of the transport network, carrying capacity of vehicles, nonlinearity of the given costs for processing and transportation of flows and many other real factors and constraints. This leads to the need to develop new mathematical models, methods, algorithms and information platform for managing the handling, distribution and routing of groupage cargo flows and determines the importance of the studied scientific and applied problem for the development of the transport system of Ukraine. This work is a continuation of a series of studies of hierarchical networks with discrete flows [12-23], which proposes a methodology for mathematical modeling of the phased development of nodes and transport routes of the backbone network, based on solving the problems of optimizing its structure and distribution of flows.

1. Hierarchical Network Structure

Each node in a hierarchical network has a name, a unique index, and a sequence number. Each node can be matched with a set of indices (numbers) of other nodes corresponding to it in the backbone and internal network. In a multi-product network, each node can exchange correspondence (messages, cargo) with all other nodes. Correspondence is characterized by a source node, a drain node and a value, which for data transmission networks is given by the number of bytes, kilobytes, etc., and for transport networks – by the number of packaged goods in a package of a unified size. In the backbone network, all correspondence is transmitted via communication channels or transported in vehicles in transport blocks of a given size (capacity, volume). The size of the transport unit is measured by the number of units of correspondence that fit into it (for example, 64 KB, 40 packaged cargo). All trunk nodes are sorting centers in which correspondence is first sorted by destination addresses (nodes) and then packed into transport blocks. In data networks, data transmission multiplexers play the role of sorting centers, and a virtual container acts as a transport unit. Since the size of individual correspondence is much smaller than the size of the transport block, they can be combined (packed) several times and in different nodes with correspondence with different destination addresses during sorting (multiplexing). With such a consolidation of correspondence in the network nodes, the number of directions for their sorting and the number of transport blocks required for their packaging are reduced, but in some nodes there are additional volumes of sorting correspondence that have not reached the address of their destination. In addition, the time of delivery to the recipient of correspondence, which undergoes additional sorting at transit hubs, increases.

In the inner zone of each trunk node there are nodes for the delivery and collection of correspondence (clients of the data transmission network or transport network), which can exchange correspondence with each other and with other nodes of the hierarchical network only through this trunk node. The transmission or transportation of correspondence in the internal network is carried out by regional providers or along the routes of internal vehicles.

Fig. 1 shows fragments of a three-tier network, where i , j , k – trunk nodes with their own backbone service zones (SZ), m – nodes of delivery and collection of correspondence in the internal service area (SA) of each trunk node (internal networks).

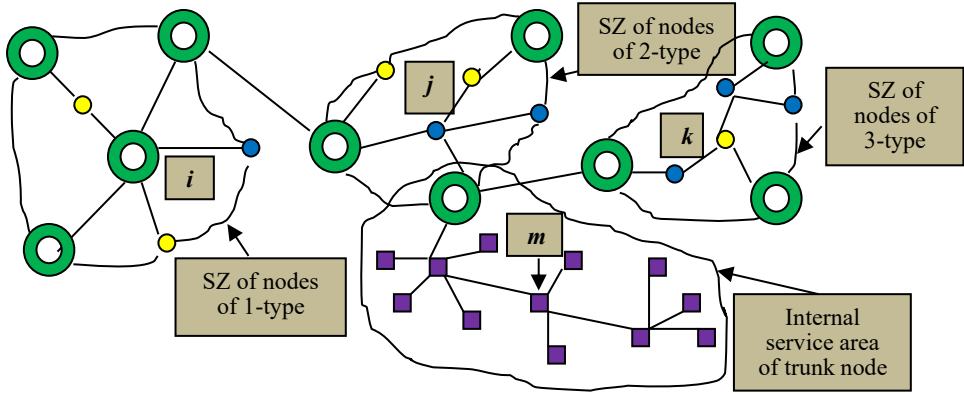


Fig. 1. Fragments of a hierarchical network

Trunk nodes of different types differ in functionality, level of technical equipment, number of service personnel, etc. Some of them can sort flows to all trunk nodes, while others can only sort to trunk nodes in their service area. In some trunk hubs, it may be prohibited to sort transit correspondence flows and process transit flows of transport blocks.

In [12] discusses the generalized problem of packaging and distribution of correspondence flows in a hierarchical network, the solution of which is carried out in several stages. At the first stage, the problem of choosing the hierarchical structure of the backbone network and the scheme of sorting correspondence in the network nodes and packing them into transport blocks is solved [14-16, 19]. At the second stage, there is a problem of distribution and routing of flows of transport blocks with collective correspondence, which were formed when solving the first problem [13, 17, 18, 20, 21, 22-25]. Groupage correspondence means messages combined into one transport block or packaged cargoes with different addresses of destination, which may not coincide with the address of destination of the transport block. Groupage correspondence is formed to minimize the number of transport units required for their packaging and transfer or transportation in the backbone network.

2. Problems of Correspondence Packaging and Network Structure Selection

For further network development, according to the input data, it is necessary to solve the problem of optimizing its structure, to obtain a scheme for sorting outgoing flows and distributing the costs of sorting flows and the costs of loading and unloading outgoing and incoming transport blocks by nodes. The general scheme of the algorithm for solving the problem is based on the solution of the packaging problem [14, 15]. The problem of packaging arises in trunk transport networks and backbone

data transmission networks with discrete flows of correspondence from suppliers to recipients, the essence of which is to concentrate the flows of cargo and information between network nodes. Correspondences with different destination addresses emanating from network nodes can be combined with each other and packed into common transport blocks (containers or virtual containers). As a result of the merging of flows, the number of transport blocks for the transportation of correspondence is reduced, the number of directions for sorting correspondence in the network nodes to other nodes is reduced, the load factor of transport blocks and vehicles increases, and the high capacity of the main communication channels is used more productively. At the same time, transit flows of correspondence arise in some nodes of the network, which leads to an increase in the total cost of processing flows in the network and an increase in the time of delivery of correspondence to the recipient.

Let $G(N, E)$ – hierarchical backbone network with set of nodes $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$, $n = |N|$, where N_1, N_2, N_3 – sets of nodes of the first, second and third type, respectively, and a set of undirected arcs E , $e = |E|$. It is assumed that the geographical coordinates of the location of the network nodes are known and the integer matrix of correspondence flows between all network nodes is known $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$, in which the rows correspond to the sending nodes and the columns to the destination nodes, and there is some transformed matrix $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$, whose elements are integer sought variables of the packaging problem. All correspondence is homogeneous (of the same type), and during transportation it can be combined in different nodes and packed in transport blocks only as a whole, that is, it is forbidden to branch them (splitting into parts) and transport them along several routes. Flows a_{ii} , $i = \overline{1, n}$, in the matrix A represent internal flows between nodes of the fourth type in the service area i -th nodes that are not transported through the backbone network. All correspondence in the backbone network must be transported in some fixed-capacity transport blocks $\omega \gg a_{ij}$, $i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$, $\omega \in \mathbb{Z}^+$.

It is required to determine the quantitative and qualitative composition of the nodes network and correspondence sorting scheme at each node, which minimizes the reduced costs of network operation. Formally, it is necessary to solve the packaging problem for all possible combinations of node types and find a minimum of functions

$$F = \sum_{ij \in S} C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) + \sum_{i=1}^n C_{sort}^i(x_i, q_i) + \sum_{i=1}^n C_{load}^i(u_i) \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ji} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ji}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} \leq h_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$x_{ij}, u_{ij} \geq 0 \text{ and integers, } \forall ij \in S, \quad (4)$$

when solving the problem, the constraints on the time of delivery of correspondence flows to the recipient are also taken into account

$$t_{ij} \leq T_{ij} \quad \forall ij \in S, \quad (5)$$

and the number of transit merges

$$v_{ij} \leq v_{\max} \quad \forall ij \in S, \quad (6)$$

where S – set of index pairs (i, j) corresponding nodes; $x_{ij} = a_{ij} + \sum_{rs} a_{rs}^*$, if the correspondence a_{ij} has not been combined with any other correspondence, where $\{a_{rs}^*\}$ – a set of correspondence combined with correspondence a_{ij} , and $x_{ij} = 0$, if the correspondence a_{ij} merged with any other correspondence or $i = j$; $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij})$ – nonlinear transport cost function dependent on the number of transport blocks $u_{ij} = \left\lceil \frac{x_{ij}}{\omega} \right\rceil$, ($\lceil x \rceil$ – smallest integer, greater than or equal x) and length d_{ij} – ways of their transportation between nodes i and j .

As a rule, in mathematical models describing the processes of processing and transporting flows, costs are associated with the value of the flow along the arcs of the network or the routes of flow transmission. For data networks, where arcs are associated with communication channels, such arrangements are quite acceptable. In the case of transport networks, it is much more difficult to adequately define cost functions, such as $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij})$, therefore, as a result of solving the problem, get a reliable answer. In problem (1)-(4), only the approximate estimate of transport costs and the lower limit of costs for processing transport blocks are calculated. Therefore, as a $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij})$ the function of the unit cost of transportation of the flow of the value of the u_{ij} at a distance d_{ij} on the carrying capacity of the vehicle or the bandwidth of the communication channel, which is set as a parameter $w_\xi \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$, $\xi = \overline{1, \alpha}$. For example, it can be assumed that $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) = u_{ij}(k_1^\xi + k_2^\xi d_{ij}) / w_\xi$, $\forall ij \in S$, where k_1^ξ , k_2^ξ – specified coefficients. At the same time, the structure of the network does not depend on the choice of value w_ξ , and transport costs are calculated only approximate (at a given value of w_ξ) in the distribution of the formed flows of transport blocks along the shortest paths according to the lexicographic criterion: minimum arcs in the path, minimum path length; $C_{sort}^i(x_i, q_i)$ – nonlinear cost function of total volume $x_i = a_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (a_{ij} + a_{ji}) + \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}$ and the number of sorting directions $q_i = q_{in}^i + \sum_{j=1}^n \delta_{ij}$ correspondence processed in the node i ($\delta_{ij} = 1$, if $x_{ij} \neq 0$ and $\delta_{ij} = 0$, if $x_{ij} = 0$, and q_{in}^i determines the specified number of sorting directions for processing correspondence a_{ii} , $i = \overline{1, n}$); $C_{load}^i(u_i)$ – nonlinear cost

function of total number of transport blocks $u_i = \sum_{j=1}^n (u_{ij} + u_{ji})$, processed in the node i ; h_i , $i = \overline{1, n}$ – maximum throughput of the i -th node for processing transit correspondence. For nodes of the second and third types $h_i = 0$.

When solving the problem, delivery time constraints are also taken into account $t_{ij} \leq T_{ij} \quad \forall ij \in S$ and the number of transit merges $v_{ij} \leq v_{\max} \quad \forall ij \in S$, correspondence during their transportation from the nodes of departure to the nodes of destination, where T_{ij} and $v_{\max}$ – the time of delivery of correspondence to the recipient and the maximum allowable number of transit associations of correspondence are set accordingly. When calculating the delivery time, parameters are used that are not explicitly included in the model: the specified time for sorting correspondence and the time for transit overloading of transport blocks in network nodes, the average speed of vehicles or message transmission, etc. (the 4 part of this work).

The first component of function (1) determines the transport costs, the second – the sorting costs, and the third – the costs of handling the transport blocks. Expressions (2), (3), and (4) represent balance conditions, node bandwidth constraints, and variable values x_{ij} .

In [15] algorithms are proposed for solving the problem of packaging with functions of costs for processing and transportation of correspondence, which are based on a discrete analogue of the local descent method, when the vicinity of the metric space of admissible solutions is selected for heuristic considerations, taking into account the specifics of data structures and features of the problem.

It should be noted that when solving the problem, it is possible not to take into account the constraints on the bandwidth of nodes (3). Additional constraints $t_{ij} \leq T_{ij}$ (5), $v_{ij} \leq v_{\max}$ (6), $\forall ij \in S$ they may also not be taken into account, but at the request of the transport network designer or the administrator of the data network, all constraints can be set as directives. If the problem of choosing a structure was solved for the transport network, then it is necessary to additionally solve the problem of delivering empty containers [26].

In the process of solving the problem for network development, not only the structure of the network is determined, but also the optimal scheme for sorting the outgoing flows of correspondence in the selected structure. If the present cost functions are used $C_{\text{sort}}^i(x_i, q_i)$, $C_{\text{load}}^i(u_i)$, adequate to the processes of sorting and processing, then for the network nodes it is possible to obtain a fairly realistic estimate of their size, that is, to determine the necessary reduced costs for the functioning of the nodes for the period of completion of planning (the second component of the function (1) and partially the third – without taking into account the costs of transit transshipment of transport blocks). For transport costs and handling costs of transport blocks, only preliminary estimates are calculated. Real estimates of these costs can be obtained only after solving the problem of distribution and routing of the formed transport blocks on the transport network or data transmission network (only incoming and outgoing flows are taken into account in the costs of processing transport blocks in network nodes – transit flows are not taken into account; for transport networks, the costs of transportation and handling of empty containers are not taken into account).

In addition to the structure of the network, the main results of solving the problem are flow matrices $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$ and $U = \|u_{ij}\|_{n \times n}$ correspondence and transport blocks; matrix of preliminary estimates of the time of delivery of correspondence to recipients $\tilde{T} = \|\tilde{t}_{ij}\|_{n \times n}$; reference matrix of merging correspondence flows $C = \|c_{ij}\|_{n \times n}$ [27], the elements of which are defined as follows:

$$c_{ij} = \begin{cases} k, & \text{if flow } a_{ij} \text{ merges with the flow } a_{ik}, \\ i, & \text{if flow } a_{ij} \text{ is directly sent to the node } j, \\ 0, & \text{if } i = j, \end{cases}$$

where k – the node through which the flow conversion is performed a_{ij} . Matrix C it is used to restore the sequence of network nodes $\Omega_{ij} = \{(i, k_1), (k_1, k_2), \dots, (k_m, j)\}$ with intermediate nodes $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, in which additional (transit) sorting of each of the flows is performed a_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$, and their total number $\nu_{ij} = |\{k_1, k_2, \dots, k_m\}|$, and calculation t_{ij} – the time of their delivery to the final recipients. These results are used as input data to solve the problem of distribution and routing of transport block flows. The reference matrix of flow merging fully defines the correspondence sorting scheme in all network nodes and addresses the flows of transport blocks that will be distributed along the routes of vehicles or communication channels. In the nodes of a real transport network or data transmission network, the reference matrix is used for automated control of equipment that carries out the processes of sorting address cargo, or as a table for merging messages into virtual containers.

3. The Problem of Distribution and Routing of Transport Block Flows

Based on the results of solving the problem of optimizing the network structure for its development, need to solve the problem of distribution and routing of flows. The problem of distribution and routing of discrete multicommodity flows of transport blocks with groupage (mixed, combined) correspondence arises in transport networks with discrete cargo and in backbone data transmission networks with the technology of virtual containers [13]. Groupage correspondence, as before, means packaged cargoes with different addresses of destination combined into one transport block (container) which addresses may not coincide with the address of destination of the transport block. The substantive formulation of the problem consists in the selection of such a scheme for the distribution and routing of flows of transport blocks, in which the reduced costs for processing and transportation of flows are minimized. The solution of the problem should be carried out in an interactive mode and determine the main technical and economic indicators of the backbone network functioning when changing the initial data, parameters and constraints of the transport model. Since it is not always possible to formalize all the factors influencing the choice of the best solution, the practical experience of transport network dispatchers and administrators of data

transmission networks, as well as the knowledge base in the information and analytical decision support system [28], can be used for the final selection of the distribution and routing scheme of flows.

Let $G(N, P)$ – a hierarchical backbone network with a set of undirected arcs P , $p \in P$ and a set of nodes $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$, $n \in N$, where N_1, N_2, N_3 – sets of nodes of the first, second and third types, respectively. The nodes of the network correspond to the nodes of sorting, departure, destination and overload of flows, and the arcs correspond to the sections of roads for transport networks or communication channels for data networks connecting network nodes.

The flows of network are defined by the initial $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$ and transformed $A' = \|a'_{ij}\|_{n \times n} = X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$, integer matrices of correspondence and integer matrix of transport blocks $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|_{n \times n} = U = \|u_{ij}\|_{n \times n}$. There is also a matrix of preliminary estimates of the time of delivery of correspondence to recipients $\tilde{T} = \|\tilde{t}_{ij}\|_{n \times n}$ and other information obtained after solving the problem of choosing the network structure. Matrix elements $\tilde{T}$ act as initial constraints on delivery time when solving the problem of distribution and routing of flows of transport blocks.

Let $\{m_k\}$, $k = \overline{1, l}$ – a given set of projected vehicle routes or communication channels, each of which consists of a sequence of network nodes and arcs G , connecting the start and end nodes of a route or communication channel. It is assumed that the set $\{m_k\}$ for each undirected arc of the network G contains forward and reverse routes, and in the process of solving the problem in the set $\{m_k\}$ new routes generated by certain rules may be included. Set $\{m_k\}$ can contain multiple routes connecting any pair of nodes. Each route of the transport network is associated with its characteristics: the function of the average annual present costs for the operation and maintenance of the route; carrying capacity and frequency of movement of vehicles; time of arrival and departure of the vehicle for each node in the route, etc. For each route in the data transmission network, the function of the average annual reduced costs for the operation and maintenance of the communication channel, its length and bandwidth are specified.

We will build a route multi-network $G_M(N, P_M)$ transitive closure of nodes of all routes with $\{m_k\}$, where N – a set of network nodes, P_M – the set of its oriented route arcs. Between any nodes α and β network G_M there is a route arc if they are connected by at least one vehicle route or communication channel with $\{m_k\}$. Let's introduce the variables: $u_{ij,k}^{\alpha\beta}$ – unknown flow of transport blocks from i into j , passing in an arc $p_{\alpha\beta} \in P_M$, obtained from the route m_k ($u_{ij,k}^{\alpha\beta}$ determine arc flows in transport blocks on the route network G_M); $u_{ij,k}^{\eta\xi}$ – unknown flow of transport blocks from i into j , passing in an arc $p_{\eta\xi} \in P$ on the route m_k .

Required to minimize function

$$\sum_{k=1}^l C_{tr}^k \left(\left(\sum_{\eta^\xi \in q_k} \sum_{ij \in S} u_{ij,k}^{\eta^\xi} \right), d_k \right) + \sum_{\beta=1}^n C_{load}^\beta \left(\sum_{\alpha=1}^n \sum_{k=1}^l \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) \right) \quad (7)$$

subject to

$$\sum_{ij \in S} u_{ij,k}^{\eta^\xi} \leq W_{\eta^\xi}^k \text{ for all } \eta^\xi \in q_k, \quad k = \overline{1, l}; \quad (8)$$

$$\sum_{\beta=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l u_{ij,k}^{\alpha\beta} - \sum_{\beta=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l u_{ij,k}^{\beta\alpha} = \begin{cases} \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} & \text{at } i = \alpha, \\ 0 & \text{at } i \neq \alpha, j \neq \alpha, \\ -\sum_{i=1}^n \tilde{a}_{ij} & \text{at } j = \alpha, \text{ for } \alpha = \overline{1, n}, j = \overline{1, n} \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_{\alpha=1}^n \sum_{k=1}^l \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) - \sum_{j=1}^n (\tilde{a}_{\beta j} + \tilde{a}_{j\beta}) \leq 2b_\beta, \quad \beta = \overline{1, n}; \quad (10)$$

$$\sum_{\beta=1}^n \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) \leq b_\alpha^k, \quad \alpha \in v_k, \quad k = \overline{1, l}; \quad (11)$$

in specific cases of solving the problem, restrictions on the prohibition of branching flows can be added to the specified constraints

$$u_{ij,k}^{\alpha\beta} = \begin{cases} \tilde{a}_{ij}, & \text{if the flow passes in an arc } \alpha\beta \in m_k, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (12)$$

$$u_{ij,k}^{\alpha\beta} \geq 0, \quad u_{ij,k}^{\eta^\xi} \geq 0, \text{ and integers,} \quad (13)$$

constraints on the time of delivery of correspondence flows to the recipient are taken into account

$$t_{ij} \leq \tilde{t}_{ij}, \quad ij \in S. \quad (14)$$

It is assumed that there is an operator $\Phi: u_{ij,k}^{\alpha\beta} \Rightarrow \{u_{ij,k}^{\eta^\xi}\}$, $p_{\alpha\beta} \in P_M$, $p_{\eta^\xi} \in P$, $ij \in S$, $k = \overline{1, l}$, which displays the flow along the route arc of the route m_k on the network G_M to the corresponding subset of the route arcs m_k on the network G .

In formulas (7)-(14) the following notations are introduced: C_{tr}^k is a nonlinear function that determines the dependence of transport costs on the number of transport blocks transmitted along the route m_k and the length of the route d_k . It is assumed that the present cost functions C_{tr}^k specified for each route with $\{m_k\}$. Transport networks are characterized by the dependence of such functions on the working fleet and carrying capacity of vehicles on the route, and data transmission networks – on the bandwidth and length of communication channels. It should be noted that the functions of the unit cost of transportation and handling of a unit of flow (one transport unit) cannot be applied here; q_k – ordered set of arcs with P , that make up the route m_k ; C_{load}^β – nonlinear cost function for processing transport blocks in a node β ; b_β , $\beta = \overline{1, n}$ – maximum throughput β -th node in transport blocks, the

throughput is set for transit flows, since the outgoing and incoming flows for each node must be handled unconditionally. For nodes of the third type $b_\beta = 0$; $W_{\eta\xi}^k$ – the carrying capacity of the vehicle or the capacity of the communication channel on the route m_k on the arc $\eta\xi \in P$ in transport blocks, $W_{\eta\xi}^k \in \{w_1, w_2, \dots, w_v\}$, where $w_1, w_2, \dots, w_v$ – integers ordered in ascending order of positive numbers; b_α^k – limit on the maximum total number of transport blocks that can be processed at a transit node α on the route m_k ; U_k – an ordered set of nodes with N on the route m_k ; $t_{ij}, \tilde{t}_{ij}, ij \in S$, – estimated and specified time for the delivery of correspondence flows a_{ij} with i into j .

The first component of the function determines the transport costs, the second – the costs of processing the transport blocks. Conditions (9) ensure continuity of flow, and conditions (10), (8), (9) are, respectively, constraints on the capacity of nodes; route capacity; volumes of processing of transport blocks in the nodes of vehicles or in the switched nodes of the data transmission network.

When solving a problem (7)-(14) should be obtained the final technical and economic indicators of network functioning. The results of the solution contain for each node of the network a scheme of sorting of outgoing flows with estimates of the time of delivery of correspondence to recipients, the costs of sorting flows, the costs of loading and unloading outgoing, incoming and transit transport blocks, as well as the costs of transporting (transmitting) flows of transport blocks on optimized routes and complete information about the routes of their transportation.

Due to the complexity of solving the nonlinear discrete problem (7)-(14), a method for reducing it to a set of multidimensional knapsack problems with binding constraints was proposed in [13]. The essence of the decomposition is the following. It is intuitively clear that it is possible to achieve a decrease in the value of the function (7) with a maximum increase in the values of $u_{ij,k}^{\eta\xi}$ on all arcs (sections) $\eta\xi \in P$ routes $\{m_k\}$ when distributing all flows in the network G_M by the criterion: minimum transit overloads, if the number of transit overloads is equal – minimum path length. As a result, we construct some analogue of the dual problem to the problem (7)-(13) with the exclusion of nonlinear cost functions from the explicit consideration C_{tr}^k and C_{load}^β . First, let's assume that all flows $\tilde{a}_{ij}$ distributed in the network G_M according to the specified criterion. We using a reference matrix of the distribution of flows along the shortest paths $C = \|c_{ij}\|_{n \times n}$ [29] with elements

$$c_{ij} = \begin{cases} \mu, & \text{if flow } \tilde{a}_{ij} \text{ transmitted from node } i \text{ to node } j \text{ with overload at node } \mu, \\ i, & \text{if flow } \tilde{a}_{ij} \text{ transmitted from node } i \text{ to node } j \text{ without overload,} \\ 0, & \text{if } i = j, \end{cases}$$

and a given set $\{m_k\}$, $k = \overline{1, l}$, for each route m_k it's not hard to find subsets $\{u_{ij,k}^{\alpha\beta}\}$ flows that could potentially be allocated to this route. Let's denote $|\{u_{ij,k}^{\alpha\beta}\}| = \varepsilon_k$.

Because G_M – multi-network, for any m_{k_1} , m_{k_2} , $k_1 \neq k_2$ and fixed $\alpha\beta$ and ij can be performed $\{u_{ij,k_1}^{\alpha\beta}\} \cap \{u_{ij,k_2}^{\alpha\beta}\} \neq \emptyset$.

Renumbering, starting with 1, non-zero flows $\tilde{a}_{ij}$ in the matrix $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|_{n \times n}$ in rows from left to right and in columns from top to bottom. Let's build a matrix $H = \|h_{ij}\|_{n \times n}$, in which

$$h_{ij} = \begin{cases} \text{number } h \text{ of flow } \tilde{a}_{ij}, \text{ if } \tilde{a}_{ij} \neq 0, \\ 0 \text{ otherwise, } h = \overline{1, h_{\max}}, \end{cases}$$

where $h_{\max}$ – number of non-zero elements in the matrix $\tilde{A}$, $h_{\max} \leq n^2 - n$.

Let $\xi^k = \|\xi_i^k\|_{\eta_k}$, $\eta_k = |\nu_k|$, $k = \overline{1, l}$ – vectors containing host numbers (G or G_M) on the routes m_k when passing them from left to right. This means that direct and return routes may or may not coincide. Let's write down the display operator of any flow $u_{ij,k}^{\alpha\beta} \in \{u_{ij,k}^{\alpha\beta}\}$ along the route arc $\alpha\beta$ upon m_k on the set of arcs of this route in the network G in the form of $\Phi: u_{ij,k}^{\alpha\beta} \Rightarrow \{u_{ij,k}^{\xi_{\mu}^{\xi_{\mu+1}}}, u_{ij,k}^{\xi_{\mu+1}^{\xi_{\mu+2}}}, \dots, u_{ij,k}^{\xi_{\mu+c-1}^{\xi_{\mu+c}}}\}$, where $\xi_{\mu} = \alpha$, μ – node sequence number α in vector ξ^k , $\mu \in [\overline{1, \eta_k}]$; $\xi_{\mu+c} = \beta$, $\mu+c$ – node sequence number β in vector ξ^k , $\mu+c \in [\overline{1, \eta_k}]$.

Let's build vectors $f^k = \|f_j^k\|_{\varepsilon_k}$ and matrices $\dot{A}^k = \|\dot{a}_{ij}^k\|_{(\eta_k-1) \times \varepsilon_k}$, $\ddot{A}^k = \|\ddot{a}_{ij}^k\|_{\eta_k \times \varepsilon_k}$, $\ddot{\ddot{A}}^k = \|\ddot{\ddot{a}}_{ij}^k\|_{\eta_k \times \varepsilon_k}$, $k = \overline{1, l}$ so:
 $f_j^k = h$, if the flow $\tilde{a}_{i',j'}$, with a number h can be distributed to a route m_k . Indexes i' and j' mean indices i and j variables $u_{ij,k}^{\alpha\beta} \in \{u_{ij,k}^{\alpha\beta}\}$, where $i, j = \overline{1, n}$, therefore $\tilde{a}_{i',j'}$ define the elements $\tilde{a}_{ij}$ matrix $\tilde{A}$. For convenience, plural flows $\{u_{ij,k}^{\alpha\beta}\}$ can be ordered according to increasing flows numbers $\tilde{a}_{i',j'}$ in the matrix H ;

$$\begin{aligned} \dot{a}_{ij}^k &= \begin{cases} \tilde{a}_{i',j'}, \text{ for } i = \overline{\mu, \mu+c-1}, \\ 0 \text{ for } i \notin [\mu, \mu+c-1], i = \overline{1, \eta_k-1}; \end{cases} \\ \ddot{a}_{ij}^k &= \begin{cases} \tilde{a}_{i',j'}, \text{ if } (i = \mu) \vee (i = \mu+c), \\ 0 \text{ otherwise, } i = \overline{1, \eta_k}; \end{cases} \\ \ddot{\ddot{a}}_{ij}^k &= \begin{cases} \tilde{a}_{i',j'}, \text{ if } (i = \mu \wedge i' \neq \alpha) \vee (i = (\mu+c) \wedge j' \neq \beta), \\ 0 \text{ otherwise, } i = \overline{1, \eta_k}; \end{cases} \\ \ddot{\ddot{\ddot{a}}}_{ij}^k &= \begin{cases} \tilde{a}_{i',j'}, \text{ if } (i = \mu \wedge i' = \alpha) \vee (i = (\mu+c) \wedge j' = \beta), \\ 0 \text{ otherwise, } i = \overline{1, \eta_k}, \end{cases} \end{aligned}$$

for $j = \overline{1, \varepsilon_k}$, $k = \overline{1, l}$, where $\vee \wedge$ — logical "or" and "and" signs.

Here is the algorithm for generating data.

Algorithm 1. Formation $f^k, \dot{A}^k, \ddot{A}^k, \ddot{\ddot{A}}^k$

1. For $\{k \mid k = \overline{1, l}\}$ do step 2-14.
2. $\dot{A}^k \leftarrow 0, \ddot{A}^k \leftarrow 0, \ddot{\ddot{A}}^k \leftarrow 0, \ddot{\ddot{\ddot{A}}}^k \leftarrow 0$.
3. For $\{j \mid j = \overline{1, \varepsilon_k}, j \equiv u_{i'j,k}^{\alpha\beta}\}$ do step 4-13.
4. $f_j^k \leftarrow h_{i'j}$.
5. For $\{\mu \mid \mu = \overline{1, \eta_k - 1}\}$ while $\xi_\mu^k \neq \alpha$ go to step 5.
6. $\ddot{a}_{\mu j}^k \leftarrow \tilde{a}_{i'j}$.
7. If $i' \neq \alpha$, then $\ddot{\ddot{a}}_{\mu j}^k \leftarrow \tilde{a}_{i'j}$.
8. If $i' = \alpha$, then $\ddot{\ddot{\ddot{a}}}_{\mu j}^k \leftarrow \tilde{a}_{i'j}$.
9. For $\{i \mid i = \overline{\mu, \eta_k}\}$ while $\xi_i^k \neq \beta$ do $\dot{a}_{ij}^k \leftarrow \tilde{a}_{i'j}$, go to step 9.
10. $\ddot{a}_{ij}^k \leftarrow \tilde{a}_{i'j}$.
11. If $j' \neq \beta$, then $\ddot{\ddot{a}}_{ij}^k \leftarrow \tilde{a}_{i'j}$.
12. If $j' = \beta$, then $\ddot{\ddot{\ddot{a}}}_{ij}^k \leftarrow \tilde{a}_{i'j}$.
13. Go to step 3. ! End of cycle by j
14. Go to step 1. ! End of cycle by k
15. End of algorithm.

Let $W^k = \|w_i^k\|_{\eta_k-1}$, $B^k = \|b_i^k\|_{\eta_k}$, $B = \|b_i\|_n$, $k = \overline{1, l}$ – respectively, the vectors of restrictions on the carrying capacity of the vehicle or the capacity of the channel on the arcs of the route m_k ; the total number of transport blocks that can be processed at the transit hub i on the route m_k ; capacity of network nodes for processing transit transport blocks.

Let's introduce variables x_j^k , $j = \overline{1, \varepsilon_k}$, $k = \overline{1, l}$, where

$$x_j^k = \begin{cases} \text{one of the meanings } 1 / \tilde{a}_{i'j}, 2 / \tilde{a}_{i'j}, \dots, \tilde{a}_{i'j} / \tilde{a}_{i'j}, \text{ if flow } \tilde{a}_{i'j}, \\ \text{with a number } j \text{ is selected for a route } m_k, \\ 0 \text{ otherwise.} \end{cases}$$

Taking into account the above limitation of formulas (8), (11) we write in the form

$$\sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \dot{a}_{ij}^k x_{f_j}^k \leq w_i^k, \quad i = \overline{1, \eta_k - 1}, \quad k = \overline{1, l}, \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \ddot{a}_{ij}^k x_{f_j}^k \leq b_i^k, \quad i = \overline{1, \eta_k}, \quad k = \overline{1, l}. \quad (16)$$

Let's denote $\sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \ddot{a}_{ij}^k x_{f_j}^k = \psi_{\varepsilon_i^k}^k, i = \overline{1, \eta_k}, k = \overline{1, l},$

$$\sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \ddot{a}_{ij}^k x_{f_j}^k = \lambda_{\varepsilon_i^k}^k, i = \overline{1, \eta_k}, k = \overline{1, l}.$$

Then the constraints (9) and (10) are written as follows:

$$\sum_{k=1}^l \lambda_i^k = \sum_{j=1}^n (\tilde{a}_{ij} + \tilde{a}_{ji}), i = \overline{1, n}, \quad (17)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{k=1}^l \psi_i^k \leq b_i, i = \overline{1, n}. \quad (18)$$

The constraint on the prohibition of thread branching (12) can be written as

$$x_j^k = \begin{cases} 1, & \text{if a flow } \tilde{a}_{i,j}, \text{ with a number } j \text{ is selected for a route } m_k, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (19)$$

Let's build the objective function of the problem: it is required to minimize the number of l the "cheapest" busiest routes from the set $\{m_k\}$ at the maximum load of arcs (sections) of these routes. "Cheap" routes are those routes that have the lowest average annual present costs for transportation and processing of flows. It is assumed that the present cost functions C_{tr}^k specified for each route with $\{m_k\}$. Transport networks are characterized by the dependence of such functions on the operating fleet and carrying capacity of vehicles on the route, and data transmission networks – on the bandwidth and length of communication channels. Therefore, for real networks, the reduced costs will be the same both for the most loaded route and for a poorly loaded or not loaded route at all. It should be noted that the functions of the unit cost of transportation and handling of a unit of flow (one transport block) cannot be used here, since it is less for routes with higher capacity, which will inevitably lead to the loading of "more expensive" routes.

In addition, it should be borne in mind that the upper limit on the number of routes l plural $\{m_k\}$ when solving the problem, it is not fixed – after solving the problem, it may turn out to be larger than the specified one, if in the process of solving it is allowed to generate and introduce new routes if it is impossible to distribute all flows.

Let's write down the objective function

$$\min_{|\{m_k\}|, C_{tr}^k} \left\{ \{m_k\} \left| \sum_{j=1}^{\varepsilon_k} \dot{a}_{ij}^k x_{f_j}^k \Rightarrow \max, i = \overline{1, \eta_k - 1}, k = \overline{1, l} \right. \right\}. \quad (20)$$

Thus, as a result of the transformation of the problem (7)-(14), its solution was reduced to a certain sequence of simultaneous solution l - multidimensional knapsack problems (20) with block constraints (15), (16) dimension $(\eta_k - 1) \times \varepsilon_k$ and $\eta_k \times \varepsilon_k$, binding constraints (17), (18) and constraints (19), and (14). The need for repeated (iterative) solution of the problem is due to the fact that in one iteration all the flows specified by the matrix $\tilde{A}$, may not be distributed along the shortest paths due to violation of any restrictions. In this case, new paths different from the original ones are chosen for undistributed flows, and new subsets are defined $\{u_{ij,k}^{\alpha\beta}\}$

and again, the knapsack problem is solved, taking into account the remaining reserve of restrictions. The iterative process continues until all flows are distributed across the network. If it is not possible to distribute all flows due to violation of individual constraints, then, at the request of the designer, relaxations can be introduced interactively for all or some constraints.

The obtained combinatorial problem is also NP-hard [30-32], therefore, for its solution in different variants and modes, a number of algorithms have been proposed, which significantly use the specifics of the problem structure, abstract data types and techniques characteristic of heuristic algorithms for solving a multidimensional backpack problem. Algorithms make it possible to obtain rational, from the point of view of the network designer, solution to the problem in a reasonable time.

4. Programs Optimization of Network Structure and of Flows Routing. Numerical Experiment Results

In fact, modeling the hierarchical structure and flows routing in a communication network is a computer technology consisting of scenarios of actions of the designer and the software system when choosing input data, parameters of programs and the network to be designed. In the information and analytical decision support system (IA DSS) [28, 33], scenarios are implemented in the form of a multi-window and multi-layer graphical interface, which allows viewing the network structure and its individual fragments in a cartographic form; outgoing and incoming flows in network nodes; the values of all specified constraints and optimization parameters; optimization results for different options for solving the problem, etc. The designer in the dialog mode can change the values of the initial data and parameters of the problem, get a set of solutions and choose the most favorable of them. At the same time, he can always compare solutions for assessing the technical and economic indicators of the network, depending on the selected parameters and preference criteria. For an experimental study of solving the problems as well as for training dispatchers to work with the programs, their demo version was developed [16, 17, 34, 35]. Such a programs are included in the IA DSS and can work offline, when all the necessary input data is generated by a pseudorandom number sensor. IA DSS is being developed at the Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine and in the future will function on a real-time scale and allow to effectively manage nonlinear and non-stationary processes of processing and distribution of flows at all levels of the hierarchical network.

In fig. 2 shows the main forms of the programs into which the input data is entered. In them, you can select different options for the programs and specify whether you need to optimize the network structure in an automated mode or enter the types of nodes and their service areas manually, use cost functions in the algorithms for solving the problem or not. To change the initial value of flows in the process of solving the problems, the flow prediction coefficient can be used (K_p), the initial value of which is set to one by default. At the bottom of the main forms there is a window for displaying current programs messages, and buttons for activating actions. All output data is output to data sets, and displayed on a computer screen using the system program WordPad. In the output form displays the selected network structure and the main preliminary technical and economic indicators of its functioning, and for each node of the network, an edited scheme for sorting

correspondence flows and forming flows of transport blocks. If the problem of choosing a structure solve for a transport network, then at the beginning of the form, the results of solving the problem of balancing the matrix of container flows [26], which arises due to a violation of the balance conditions – the equality of the sum of outgoing and incoming containers in individual network nodes. After solving the problem of distribution and routing of flows of transport blocks, in an additional output form are displayed sorting schemes flow with final estimates of the time of their delivery to recipients, and the results of solving the routing problem, which contain final technical and economic indicators of network functioning and complete information about the transport of flows along optimized routes.

Numerical example of designing a network. Let's consider the results of mathematical modeling of solving problems of current planning on the road transport network. To conduct the experiment, a container transport network with a number of nodes was generated by a pseudorandom number sensor $n=120$ and the degree of nodes $val=5$. Arc lengths d_{kl} , $kl \in P$ were generated in the range from 80 to 300 km, and the value of the outgoing flows of cargo (goods) from the nodes of the first type was set in the range from 1 to 9 units, from the nodes of the second and third types – in the range from 1 to 5 units. It was assumed that the routes $\{m_k\}$, $k=\overline{1,l}$ vehicles coincide with the arcs of the network and traffic on the routes is allowed in both directions, so the $l=120 \times 5/2=300$ projected routes.

Fig. 2. Main forms of the programs

The following parameter values were taken (see Fig. 2): container size $\omega = 40$ units of discrete cargo; time for processing (sorting) discrete cargoes in network nodes $T_a=24h$; carrying capacity of motor vehicles $W_{\eta\xi}^k$ on all arcs $\eta\xi \in q_k$ of all routes $\{m_k\}$, $k=\overline{1,l}$ was accepted as the same, equal W , and varied within $W \in \{40, 20, 10\}$ containers; time for transit transshipment of containers in network nodes $T_b=12h$; time of parking of vehicles at the end nodes of routes $T_{end}=22h$; periodicity of vehicle traffic $T_{move}=24h$; average speed of vehicles $V_{av} = 80$ km/h; daily throughput capacities of transit processing nodes h_i and b_i , $i=\overline{1,n}$ 5000 units of discrete cargo and 500 containers, respectively, were accepted; time of delivery of

cargo to the recipient t_{ij} was calculated in a day, so the maximum delivery time was set in a day and accepted $T_{ij}=15$ days for everyone $ij \in S$; maximum number of discrete cargo bundles $\nu_{\max}$ was not restricted; branching of container flows is prohibited.

Cost functions can be either piecewise convex (gully) or convex or concave for different communication networks. To calculate the average annual present costs for transportation and processing of flows, specific functions in conventional units of cost, typical for transport enterprises, were used:

$$C_{sort}^i(\cdot) = c_1 x_i \exp\left(-\frac{c_2 x_i}{1 + q_i}\right), \quad i = \overline{1, n},$$

where $C_{sort}^i(\cdot)$, x_i , q_i – respectively, the costs of sorting cargo flows, the total flow, the number of directions for sorting flows to other network nodes in the node i ;

$$C_{load}^i(\cdot) = \sqrt{c_3 u_i^2 + c_4 u_i}, \quad i = \overline{1, n},$$

where u_i – the sum of outbound, inbound, and transit containers handled at the node i , (in the problem of optimizing the network structure, only incoming and outgoing flows are taken into account in the cost of handling containers in network nodes, but transit flows are not taken into account);

$$C_{tr}^{ij}(\cdot) = \frac{u_{ij}}{W} \left[\frac{c_5 (T_{end} + 2d_{ij} / V_{av})}{T_{move}} + c_6 + c_7 d_{ij} \right] \quad \forall ij \in S;$$

$$C_{tr}^k(\cdot) = D_{ts}^k W (c_8 + c_9 d_k) + c_{10} D_{mb}, \quad k = \overline{1, l},$$

where $c_1 - c_{10}$ – задані коефіцієнти.

Here: $D_{ts}^k = (2T_{end} + 2d_k / V_{av}) / T_{move}$ – working fleet of vehicles on the route m_k ;

$$D_{mb} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \left[t_{ij}^c / T_{move} \right] - \text{working fleet of containers in the transportation}$$

network;

$t_{ij}^c = 2t_a + d_{ij}^k / (V_{av} \theta) + \psi_{ij} t_b$ – total time of loading and unloading of containers $\tilde{a}_{ij}$ in the initial i and end j points of destination and the time of their transportation from i to j on a path of length d_{ij}^k , where ψ_{ij} – number of transit overloads $\tilde{a}_{ij}$ on the way from i to j , θ – time rationing coefficient (for transport networks $\theta = 24$ hours, for data networks $\theta = 1$).

To calculate the time of delivery of goods to the final recipient, the following formulas were used:

$$t_{ij} = \begin{cases} 2t_a + d_{ij} / (V_{av} \theta) + \psi_{ij} t_b, & \text{if } c_{ij} = i, \\ t_a (\nu_{ij} + 2) + \sum_{\xi \eta \in \Omega_{ij}} (d_{\xi \eta} / (V_{av} \theta) + \psi_{\xi \eta} t_b), & \text{if } c_{ij} \neq i, \end{cases}$$

where ψ_{ij} , $\psi_{\xi \eta}$ – the number of transit transshipments of the container in which the cargo is located a_{ij} on the segment (i, j) or

$(\xi, \eta) \in \Omega_{ij} = \{(i, k_1), (k_1, k_2), \dots, (k_m, j)\}$, d_{ij} , $d_{\xi\eta}$ – the distance of the segment, c_{ij} – elements of the reference matrix of merging correspondence flows $C = \|c_{ij}\|_{n \times n}$ [27].

When solving the problems, we calculated costs in conventional units of cost (c.u.) after optimization: costs for sorting cargo C_{sort} , costs of loading and unloading containers into vehicles C_{load} , transportation costs C_{tr} , the total network costs $C_{all} = C_{sort} + C_{load} + C_{tr}$; average container load factor

$$K_{con} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\delta_i} \sum_{j=1}^n x_{ij} / \left(\left[\frac{x_{ij}}{\omega} \right] \omega \right), \delta_i = \sum_{j=1}^n \delta_{ij}; \text{ average number of cargo sorting}$$

directions in the network node $N_{sort} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$.

Initially, 28 nodes of the second type and 92 nodes of the first type were generated for the network. The task of optimizing the network structure was solved for $W \in \{40, 20, 10\}$ with constant values of discrete cargo flows and other specified parameters. For all values W the same network structure was obtained, containing 79 nodes of the first type and 41 nodes of the second type. Therefore, to solve the problems of distribution and routing of flows of empty and loaded containers for $W \in \{40, 20, 10\}$ as input data, the results of solving the problem of optimizing the network structure, obtained at the $W = 40$.

Results of solving problems on the initial and optimized network for the carrying capacity of vehicles $W = 40, 20, 10$ are given in Table 1, 2 and in Fig. 3, 4. The following notations are adopted in the tables: C_{all} , C_{tr} , C_{sort} , C_{load} – the total network costs ($C_{all} = C_{tr} + C_{sort} + C_{load}$), costs of transport, sorting, loading and unloading containers in mln. conventional units; l , l^+ , l^0 – the number of specified, entered and loaded vehicle routes; D_{tr} – working fleet of vehicles; K_{tr} – average vehicle load factor; D_{con} – working fleet of containers; K_{con} – average container load factor; N_{sort} – the average number of backbone directions for sorting discrete cargoes in the network node; t_{min} , t_{max} , t_{mean} – minimum, maximum and average time of delivery of discrete cargo to the consignee per day; V_1 , V_2 , V_3 – options for solving the problem.

In the variants V_1 and V_2 the distribution of container flows was carried out along specified routes coinciding with the arcs of the network, and if it was impossible to distribute all flows, the introduction of new routes was allowed. In the variant V_1 constraints on the time of delivery of cargo to the recipient $\tilde{T} = \|\tilde{t}_{ij}\|_{n \times n}$ were taken into account, and in the variant V_2 were weakened. In the variant V_3 for each pair of nodes (i, j) $i = \overline{1, n-1}, j = \overline{i+1, n}$ the route of the vehicle was generated in the network according to the criterion: minimum transit nodes, if the number of transit

nodes is equal – minimum length. Total generated $l = n(n-1)/2 = 120 \times 119/2 = 7140$ routes, the movement of vehicles on the routes was allowed in both directions. In the variant V_3 any flow of containers can be delivered to the recipient without transit overload. From the tables, you can see that for the V_1 and V_2 at $W = 40$ and $W = 20$ full costs with the relaxation of constraints on t_{ij} decrease slightly, and $t_{\max}$ noticeably growing (Fig. 4a).

Table 1

Solution Results	Initial Network $N_1 = 92, N_2 = 28$								
	$W = 40$			$W = 20$			$W = 10$		
	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3
C_{all}	25,396	25,186	152,78	19,464	19,337	79,397	16,975	19,048	42,706
C_{tr}	20,002	19,770	148,17	14,069	13,488	74,791	11,581	13,030	38,100
C_{sort}	3,216	3,216	3,216	3,216	3,216	3,216	3,216	3,216	3,216
C_{load}	2,178	2,200	1,389	2,178	2,632	1,389	2,178	2,802	1,390
l	300	300	7140	300	300	7140	300	300	7140
l^+	5	0	0	126	97	0	388	461	0
l^0	305	300	900	426	397	900	688	761	900
D_{tr}	610	600	1819	852	794	1819	1376	1522	1819
K_{tr}	0,400	0,412	0,055	0,587	0,806	0,109	0,775	0,905	0,221
D_{con}	14573	14638	13041	14573	16093	13041	14573	16715	13041
K_{con}	0,637	0,637	0,637	0,637	0,637	0,637	0,637	0,637	0,637
N_{sort}	21	21	21	21	21	21	21	21	21
$t_{\min}$	2,042	2,042	2,042	2,042	2,042	2,042	2,042	2,042	2,042
$t_{\max}$	6,738	9,359	4,775	6,738	16,999	4,775	6,738	18,302	4,775
t_{mean}	4,205	4,266	3,393	4,205	5,317	3,393	4,205	5,570	3,393

At $W = 10$, when the maximum load of vehicles is reached, in the V_2 total costs are not reduced, but increased due to the distribution of flows along longer path and an increase in the working fleet of containers. Therefore, when reducing the load capacity, a better solution can be obtained given constraints on t_{ij} .

Average delivery time t_{mean} remains fairly stable for all variants (Fig. 4b). In the variant V_3 with a decrease in the load capacity of vehicles, there is a significant reduction in total costs at the lowest values $t_{\max}$ and t_{mean} . This means that the best solution to the problem can be obtained in the V_3 with a further reduction in load capacity and deviation of flows from the shortest paths to increase the load of vehicles.

Table 2

Solution Results	Optimized Network $N_1 = 79, N_2 = 41$								
	$W = 40$			$W = 20$			$W = 10$		
	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3
C_{all}	25,116	25,030	116,64	18,430	18,415	61,336	15,993	17,679	33,687
C_{tr}	19,798	19,699	111,98	13,111	12,691	56,680	10,674	11,820	29,031
C_{sort}	3,293	3,293	3,293	3,293	3,293	3,293	3,293	3,293	3,293
C_{load}	2,026	2,038	1,363	2,026	2,431	1,363	2,026	2,566	1,363
l	300	300	7140	300	300	7140	300	300	7140
l^+	2	0	0	93	71	0	334	390	0
l^0	302	300	722	393	371	722	633	690	722
D_{tr}	604	600	1455	786	742	1455	1266	1380	1455
K_{tr}	0,364	0,370	0,064	0,575	0,783	0,128	0,758	0,902	0,259
D_{con}	13945	13983	12783	13945	15329	12783	13945	15762	12783
K_{con}	0,643	0,643	0,643	0,643	0,643	0,643	0,643	0,643	0,643
N_{sort}	19	19	19	19	19	19	19	19	19
t_{min}	2,042	2,042	2,042	2,042	2,042	2,042	2,042	2,042	2,042
t_{max}	7,251	11,012	6,554	7,251	25,573	6,554	7,251	34,835	6,554
t_{mean}	4,275	4,311	3,488	4,275	5,367	3,488	4,275	5,594	3,488

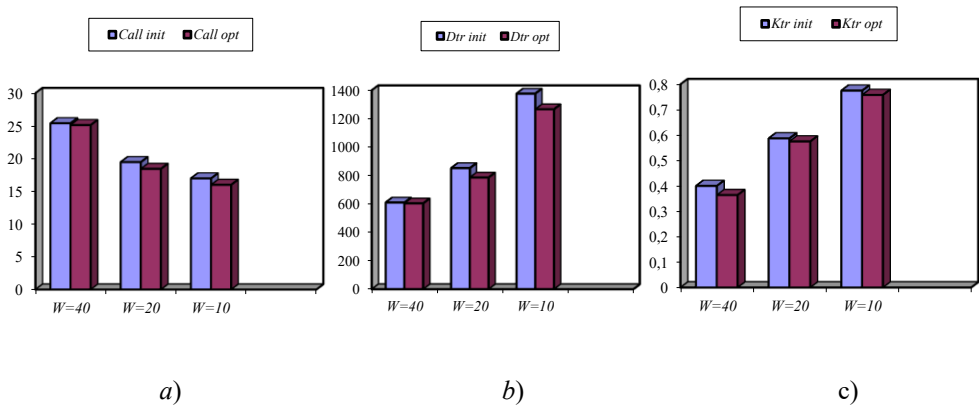


Fig. 3. Dependence of the total average annual reduced costs (a), the working fleet of vehicles (b), the load factor of vehicles (c) on the carrying capacity of vehicles for the variant V_1

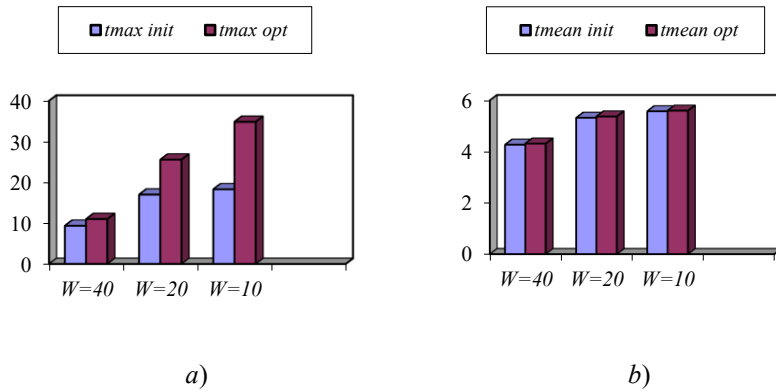


Fig. 4. Maximum (a) and average (b) time of delivery of cargo to the consignee (recipient) per day when changing the carrying capacity of vehicles for the variant V_2

Conclusion

1. The developed methodology of solving the problems of processing and distribution of discrete flows in a hierarchical multicommodity network allows selecting the hierarchical structure of the network and determining the main technical and economic indicators of its functioning when changing the initial data and parameters. The methodology can be used for current (medium-term) planning of the processes of processing and transportation of discrete correspondence flows and is aimed mainly at optimizing the use of available network resources. The methodology is based on the sequential solution of current planning problems, which are represented by a complex of mathematical models, algorithms and computer programs.

2. The developed computer technologies for solving the problems of choosing the hierarchical structure of the network, the scheme of sorting, distribution and routing of flows allow:

- in an interactive mode to simulate various variants of the network, changing the topology, hierarchical structure, routes of vehicles or information transmission, flows, parameters and constraints of the model, and from the family of results to choose the best option taking into account the selected goal function and accepted constraints;
- to increase the efficiency of the network at the level of current planning by optimizing the use of its available resources and reducing operating costs, which makes it possible to reduce tariffs for the transportation of goods or the transfer of information, attract additional customers and ensure a constant increase in profits;
- calculate preliminary technical and economic indicators of the network functioning at the specified and forecast values of flows, estimate the cost of additional resources and plan the amount of necessary investments for the modernization and development of its structural elements, which ultimately makes it possible to increase the efficiency of the network by reducing the scarce material, raw materials, energy, financial and labor resources;
- promptly redistribute flows in case of equipment failures in nodes and transport routes, unforeseen situations, natural disasters, etc.

3. The developed instrumental software tools are designed for mathematical (computer) modeling of the functioning of communication networks with discrete flows in the infrastructure complexes of large cities, regions and the country as a whole. They can be used to solve the problems of current planning and management in transport networks, backbone data transmission networks, cellular and postal communications, etc., as well as to solve the problems of operational management and long-term development and allow to increase the estimated efficiency of the functioning of the designed communication networks. The developed tools can also be used to model and optimize the functioning of traditional logistic production and transport and storage systems, including nodes of suppliers of raw materials, production of goods, warehouses and end users. In addition, the results of the work can be useful in the educational process in the training of specialists in the field of modeling and design of complex distributed multicommodity networks.

4. Experimental studies have shown high computational efficiency of the proposed algorithms and programs, and they can be recommended for the practical solution of problems of optimizing the processes of processing and transporting flows in high-dimensional communication networks (the counting time of all problems on a transport network containing 120 nodes and 300 unoriented arcs did not exceed 30 s on a PC with an Intel Core 2 Duo processor with a clock frequency of 2.66 GHz and 2 GB of RAM).

REFERENCES

1. Assad, A. A. (1978). Multicommodity network flows: A survey. *Networks*, 8(1), 37–91.
2. Kennington, J. L. (1978). A survey of linear cost multicommodity network flows. *Operations Research*, 26(2), 206–236.
3. Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., & Orlin, J. B. (1993). *Network flows: Theory, algorithms, and applications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
4. Barnhart, C., Hane, C. A., & Vance, P. H. (1997). Integer multicommodity flow problems. In P. M. Pardalos, D. W. Hearn, & W. W. Hager (Eds.), *Network optimization (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 450)*, pp. 17–31. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-59179-2_2
5. Barnhart, C., Hane, C. A., & Vance, P. H. (2000). Using branch-and-price-and-cut to solve origin-destination integer multicommodity flow problems. *Operations Research*, 48(2), 318–326. <https://doi.org/10.1287/opre.48.2.318.12378>
6. Floudas, C. A., & Pardalos, P. M. (Eds.). (2009). *Encyclopedia of optimization* (2nd ed.). New York: Springer.
7. Wang, I.-L. (2018). Multicommodity network flows: A survey, Part I: Applications and formulations. *International Journal of Operations Research*, 15(4), 145–153. [https://doi.org/10.6886/IJOR.201812_15\(4\).0001](https://doi.org/10.6886/IJOR.201812_15(4).0001)
8. Wang, I.-L. (2018). Multicommodity network flows: A survey, Part II: Solution methods. *International Journal of Operations Research*, 15(4), 155–173. [https://doi.org/10.6886/IJOR.201812_15\(4\).0002](https://doi.org/10.6886/IJOR.201812_15(4).0002)
9. Cohn, A., Root, S., Wang, A., & Mohr, D. (2007). Integration of the load matching and routing problem with equipment balancing for small package carriers. *Transportation Science*, 41(2), 238–252. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0174>
10. Hellsten, E., Koza, D. F., Contreras, I., Cordeau, J.-F., & Pisinger, D. (2021). The transit time constrained fixed charge multicommodity network design problem. *Computers & Operations Research*, 136, 105511. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105511>

11. Trivella, A., Corman, F., Koza, D. F., & Pisinger, D. (2021). The multicommodity network flow problem with soft transit time constraints: Application to liner shipping. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 150, 102342. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102342>
12. Trofymchuk, O. M., & Vasyanin, V. A. (2015). Simulation of packing, distribution and routing of small-size discrete flows in a multicommodity network. *Journal of Automation and Information Sciences*, 47(7), 15–30. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v47.i7.30>
13. Vasyanin, V. A. (2015). Problem of distribution and routing of transport blocks with mixed attachments and its decomposition. *Journal of Automation and Information Sciences*, 47(2), 56–69. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v47.i2.60>
14. Trofymchuk, O. M., Vasyanin, V. A., & Kuzmenko, V. N. (2016). Complexity of one packing optimization problem. *Cybernetics and Systems Analysis*, 52(1), 76–84. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9802-9>
15. Trofymchuk, O. M., Vasyanin, V. A., & Kuzmenko, V. N. (2016). Optimization algorithms for packing of small-lot correspondence in communication networks. *Cybernetics and Systems Analysis*, 52(2), 258–268. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9822-5>
16. Trofimchuk, A. N., & Vasyanin, V. A. (2016). Computer simulation of the hierarchical structure of a communication network with discrete multicommodity flows. *USiM*, (2), 48–57. (In Russian). <https://doi.org/10.15407/usim.2016.02.048>
17. Vasyanin, V. A. (2016). Computer modeling of distribution and routing of discrete multicommodity flows in a communication network. *USiM*, (3), 43–53. (In Russian). <https://doi.org/10.15407/usim.2016.03.043>
18. Trofymchuk, O. M., & Vasyanin, V. A. (2019). Choosing the capacity of arcs with constraint on flow delay time. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55(4), 561–569. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00165-09>
19. Trofimchuk, A. N., Vasyanin, V. A., & Ushakova, L. P. (2021). Study of the problem of optimizing the hierarchical structure of a sparse and dense communication network. *Problems of Control and Informatics*, (1), 5–21. (In Russian). <https://doi.org/10.34229/0572-2691-2021-1-1>. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PUI_2021_1_3
20. Vasyanin, V. A., Trofymchuk, O. M., & Ushakova, L. P. (2022). Problem of groupage cargo routing in the multicommodity transport network with given tariffs and delivery time constraints. *Cybernetics and Systems Analysis*, 58, 966–976. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00531-z>. <https://rdcu.be/c2Vh9>
21. Trofymchuk, O., Vasyanin, V., Sokolov, V., Chikrii, A., & Ushakova, L. (2022). On the use of Gray codes for solving 0–1 combinatorial problems of optimization in environmental and economic systems. *Cybernetics and Computer Technologies*, 4, 15–32. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.22.4.2>
22. Vasyanin, V., Trofymchuk, O., & Ushakova, L. (2023). Exact and approximate solution problem of managing the reserve of capacity of arcs a communication network. In *2023 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI)* (pp. 1–5). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10325953>
23. Trofymchuk, O. M., & Vasyanin, V. A. (2014). A technique to solve packing problem for the management of perspective development of communication network nodes. *Cybernetics and Systems Analysis*, 50(4), 560–569. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9644-2>
24. Vasyanin, V. A., Trofymchuk, O. M., & Ushakova, L. P. (2024). A methodology of the mathematical modeling for perspective development of nodes and transport routes in the multicommodity hierarchical network. I. Optimization problems. *Cybernetics and Systems Analysis*, 60, 72–83. <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00648-9>
25. Vasyanin, V. A., Trofymchuk, O. M., & Ushakova, L. P. (2024). A methodology of the mathematical modeling for perspective development of nodes and transport routes in the multicommodity hierarchical network. II. Experimental studies. *Cybernetics and Systems Analysis*, 60, 103–117. <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00648-9>

26. Vasyanin, V. A., & Ushakova, L. P. (2015). Balancing the matrix of container flows in the problem of small-lot cargo transportation. *Ecological Safety and Environmental Protection*, 17, 98–115. (In Russian). http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebpk_2015_1_13
27. Vasyanin, V. A. (2014). Reference matrix of flow merge in package optimization problems on multiproduct networks. *Systematic Support and Information Technologies*, 3, 42–49. (In Russian). <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/85552>
28. Vasyanin, V. A. (2017). *Methodology for designing multicommodity communication networks with discrete flows* (Doctoral thesis). Kyiv. (In Russian). https://itgip.org/wp-content/uploads/2017/03/dis_Vas.pdf
29. Vasyanin, V. A. (2014). A two-criterion lexicographic algorithm for finding all shortest paths in networks. *Cybernetics and Systems Analysis*, 50(5), 759–767. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9666-9>
30. Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1979). *Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness*. New York, NY: W. H. Freeman & Co.
31. Martello, S., & Toth, P. (1990). *Knapsack problems: Algorithms and computer implementations*. Great Britain: Wiley.
32. Kellerer, H., Pferschy, U., & Pisinger, D. (2004). *Knapsack problems*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-24777-7>
33. Vasyanin, V., & Trofymchuk, O. (2024). Conceptual bases for managing the processing and distribution of discrete flows in a multicommodity communication network. *Problems of Control and Informatics*, 1, 5–21. <https://doi.org/10.34229/0572-2691-2021-1-1>
34. Trofymchuk, O. M., Vasyanin, V. A., & Ushakova, L. P. (2016, July 20). *Computer program for optimizing the hierarchical structure of a multi-product communication network with discrete flows* [Certificate of copyright registration No. 66791]. State Intellectual Property Service of Ukraine. https://itgip.org/wp-content/uploads/2017/03/dis_Vas.pdf
35. Vasyanin, V. A. (2016, July 20). *Computer program for optimization of distribution and routing of discrete flows in a multi-product communication network* [Certificate of copyright registration No. 66794]. State Intellectual Property Service of Ukraine.
36. Trofimchuk, A. N., & Vasyanin, V. A. (2015). Operation time of the Kraskala algorithm with a tree and list structure of data. *Systematic Support and Information Technologies*, 3, 48–61. (In Russian). <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/123488/05-Trofimchuk.pdf?sequence=1>
37. Vasyanin, V. A., Trofymchuk, O. M., & Ushakova, L. P. (2022). Problem of building ring routes of vehicles in a multi-product hierarchical network. *Problems of Control and Informatics*, 67(3), 37–55. (In Ukrainian). <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=3664741>
38. Vasyanin, V., & Ushakova, L. (2024). Mathematical models of the problem of constructing delivery routes of cargo in the internal zones of trunk nodes of a hierarchical transport network. *Cybernetics and Computer Technologies*, 2, 15–32. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.22.4.2>

The article was received 09.05.2025 and was accepted after revision 03.09.2025

О.М. Трофимчук, В.О. Васянін

ДВОЕТАПНА ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ ТА МАРШРУТИЗАЦІЇ ПОТОКІВ В ІЄРАРХІЧНІЙ БАГАТОПРОДУКТОВІЙ МЕРЕЖІ

Анотація. У роботі розглядається методологія математичного моделювання двоетапної задачі оптимізації магістральної ієрархічної комунікаційної мережі з багатопродуктовими дискретними потоками і параметрами. Методологія заснована на послідовному розв'язанні задачі оптимізації структури мережі і задачі розподілу і маршрутизації потоків дискретних кореспонденцій. Як правило, такі мережі складаються з децентралізованої магістральної мережі та фрагментарних мереж у внутрішніх зонах обслуговування магістральних вузлів. Визначається чотири типи вузлів мережі і три рівні її ієрархії. У багатопродуктовій мережі кожен вузол може

обмінюватися кореспонденціями (продуктами, товарами, вантажами, повідомленнями) з іншими вузлами. Кореспонденція характеризується вузлом-джерелом, вузлом-стоком та величиною, яка для транспортних мереж задається кількістю тарно-штучних вантажів в упаковці уніфікованого розміру, а для мереж передачі даних – кількістю байт, кілобайт і т.п. У транспортній магістральній мережі всі кореспонденції спочатку сортуються за адресами призначення, пакуються у транспортні блоки (контейнери), а потім транспортуються у транспортних засобах по транспортних магістралях. У мережах передачі даних кореспонденції також сортуються за адресами призначення (мультиплексуються), пакуються у віртуальні транспортні блоки, а потім передаються по магістральних каналах зв'язку. Розмір (ємність, обсяг) транспортного блоку задається параметром і визначається кількістю одиниць кореспонденцій, що у нього вміщуються. Наведено математичні моделі задач оптимізації структури мережі, розподілу і маршрутизації потоків та приклад числового моделювання розв'язання задач на транспортній мережі, що містить 120 вузлів і 300 неорієнтованих дуг. Експериментальні дослідження показали високу обчислювальну ефективність запропонованих алгоритмів і програм. Вони можуть бути рекомендовані для практичного вирішення задач оптимізації процесів обробки і транспортування потоків у комунікаційних мережах великої розмірності.

Ключові слова: багатопродуктові ієрархічні мережі, дискретні потоки, задачі комбінаторної оптимізації, математичні моделі, комп'ютерне моделювання.

Стаття надійшла до редакції 09.05.2025 і прийнята до друку після рецензування 03.09.2025

Трофимчук Олександр Миколайович

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** itgis@nas.gov.ua

Васянін Володимир Олександрович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу прикладної інформатики, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4046-5243> **e-mail:** archukr@meta.ua

УДК 004.89:519.22

Oleksandr Trofymchuk¹, Corresponding Member of the NASU, D. S. (Computer science), Professor, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** trofymchuk@nas.gov.ua

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

Oleksandr Terentiev¹, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Principal researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-1753> **e-mail:** o.terentiev@gmail.com

Tetyana Prosyankina-Zharova¹, PhD, Associate professor, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9623-8771> **e-mail:** t.pruman@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

²NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODELING, INTELLIGENT DATA ANALYSIS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO SUPPORT DECISION-MAKING IN POST-WAR RECONSTRUCTION

Abstract. *The article is devoted to the actual scientific and applied problem – development of information technologies of support of making management decisions in conditions of systemic uncertainty, in particular, characteristic for periods of martial law and post-war recovery. Its peculiarity is complexity of formalization and structuring, necessity of solution of tasks of decision-making in conditions of systemic uncertainty and risk caused by military aggression. Therefore, the actual problem is development of scientifically based flexible and universal methodology of application of mathematical models, methods of intellectual data analysis, artificial intelligence, information technologies for formation of management decisions, within the framework of the corresponding decision support system (DSS). In the work, the architecture of the corresponding DSS is proposed, the key link of which is subsystem of preliminary processing of large volumes of input data formed from statistical indicators, results of observations and surveys, information from Internet sources, etc., for construction of models of the studied processes, development of scenarios, strategic and operational planning and forecasting. The system implements all elements of the technological chain of collecting and processing structured and unstructured data, mathematical modeling, methods of intelligent data analysis, scenario analysis, cognitive modeling, artificial intelligence, etc. A feature of the developed methodology is the ability to adequately assess the current situation, its retrospective and predict its development and consequences under several scenarios, which is relevant for decision-making tasks in martial law and post-war recovery.*

The proposed information technologies are intended for use in state and public administration systems. Their structure is flexible and adaptive: the components can be used separately or as part of existing decision-making support systems, implementation will increase the quality and efficiency of management decisions by optimizing analytical processes and data processing speed.

Keywords: *decision-making support system, management decisions, information technology, data processing, post-war recovery.*

О.М. Трофимчук¹, П.І. Бідюк², О.М. Терентьєв¹, Т.І. Просянкін-Жарова¹

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

²Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДАНИХ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ

Анотація. Стаття присвячена актуальній науково-прикладній проблемі – розробленню інформаційних технологій підтримки прийняття управлінських рішень в умовах системної невизначеності, зокрема, характерної для періодів військового стану та повоєнного відновлення. Її особливістю є складність формалізації та структурування, необхідність розв’язання задач прийняття рішень в умовах системної невизначеності та ризику, зумовлених військовою агресією. Тому, актуальною є проблема розроблення науково обґрунтованої гнучкої та універсальної методики застосування математичних моделей, методів інтелектуального аналізу даних, штучного інтелекту, інформаційних технологій для формування управлінських рішень, в рамках відповідної системи підтримки прийняття рішень (СППР). В роботі запропонована архітектура відповідної СППР, ключовою ланкою якої є підсистема попередньої обробки великих обсягів вхідних даних, сформованих зі статистичних показників, результатів спостережень та опитувань, інформації з Інтернет-джерел тощо, для побудови моделей досліджуваних процесів, розробки сценаріїв, стратегічного та оперативного планування і прогнозування. У системі реалізовані всі елементи технологічного ланцюга збору та оброблення структурованих і неструктурованих даних, математичного моделювання, методи інтелектуального аналізу даних, сценарний аналіз, когнітивне моделювання, штучний інтелект тощо. Особливістю розробленої методики – можливість адекватної оцінки ситуації, що склалась на даний момент, її ретроспектива та передбачення її розвитку та наслідків за декількома сценаріями, що актуально для задач прийняття рішень в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення.

Пропоновані інформаційні технології призначені до використання у системах державного та публічного управління. Їх структура є гнучкою та адаптивною: складові можуть бути використані окремо або у складі існуючих систем підтримки прийняття рішень, впровадження підвищить якість та оперативність управлінських рішень за рахунок оптимізації аналітичних процесів та швидкості оброблення даних.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень, управлінські рішення, інформаційна технологія, оброблення даних, повоєнне відновлення.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.33-49>

Вступ

Прийняття ефективних управлінських рішень в період війни відбувається в умовах мінливого зовнішнього середовища, обмеженості ресурсів, відсутності повної інформації про ситуацію, в якій воно приймається, необхідності швидкого ухвалення такого варіанта, який врахує й ризики, й можливі наслідки, в тому числі довгострокові. Системна невизначеність – характерна

ознака не лише ситуації військового стану. Не менш актуальна вона для періоду повоєнного відновлення. Адже для соціально-економічної системи країни тривала військова агресія стала джерелом системних довготривалих викликів, подолання яких вимагає залучення всього потенціалу національної стійкості, в тому числі й ефективної системи прийняття управлінських рішень. Тобто, потрібна дієва багаторівнева система підтримки прийняття рішень, адаптована до потреб державного та публічного управління, яка на всіх рівнях «держава-регіон-громада» дозволяє приймати обґрунтовані стратегічні, тактичні та оперативні рішення щодо соціально-економічного розвитку держави та забезпечення спроможності регіонів та громад, формування ефективної оновленої національної економіки та забезпечення сталого розвитку. Звичайно, розбудова такої системи не можлива без сучасних комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень, що вирізняються гнучкістю, масштабованістю, які можна легко адаптувати до потреб осіб, що приймають рішення. Основу таких систем становлять математичні моделі, інструменти інтелектуального аналізу даних, штучний інтелект, що створюють умови для забезпечення аналізу ситуації в умовах невизначеності, побудови прогнозів високої якості для прийняття ефективних (зокрема, швидких) управлінських рішень для безперервності функціонування системи державного управління та забезпечення життєдіяльності національної економіки, безпеки населення в умовах постійного перебування під загрозою, в ситуації ризику та невизначеності тощо.

Дана робота присвячена розробленню сучасних інформаційних технологій, що поєднують сучасні засоби збору та оброблення інформації, аналітичний інструментарій та призначені до використання у системах підтримки прийняття рішень державного та публічного управління. Пропоновані інформаційні технології вирізняються адаптивністю, масштабованістю, надають можливість опрацьовувати невизначеності різних типів, досліджувати економічні, екологічні та соціальні чинники, як в умовах війни, так і у період повоєнного відновлення.

Зважаючи на те, що практично відсутній досвід використання систем підтримки прийняття рішень в управлінні соціально-економічними системами у ситуації військового конфлікту та повоєнної відбудови, тема роботи є актуальною, має практичну цінність та наукову новизну.

Постановка задачі

Метою роботи є розроблення методології створення системи підтримки прийняття рішень, призначеної для вирішення задач управління повоєнним відновленням як на рівні держави, так і регіону та галузі національної економіки. Основу цієї системи становлять нові інформаційні технології збору, обробки, накопичення великих обсягів структурованої та неструктурованої інформації, математичні моделі, методи інтелектуального аналізу даних та штучний інтелект.

Задачі дослідження:

- виконати огляд підходів, що застосовуються в сучасних системах підтримки прийняття рішень;
- запропонувати методику формування інформаційної основи для формування проєкта рішення;

- розробити методику інтелектуального аналізу даних та штучного інтелекту, які дозволять виявити закономірності та зв'язки в даних, визначати чинники, що найбільше впливають (є найбільш критичними) на розвиток соціально-економічної та суспільно-політичної ситуацій, що потребують прийняття вчасних та адекватних управлінських рішень;
- запропонувати методику використання сценарного аналізу та когнітивного моделювання в поєднанні з математичними моделями, штучним інтелектом та інтелектуальним аналізом даних для формування сценаріїв суспільно-політичних, економічних та воєнно-політичних ситуацій, які потенційно можуть вимагати заходів економічного впливу, втручання органів державної безпеки, застосування та/або залучення сил оборони на коротко- та середньострокову перспективу;
- розробити методику визначення груп типових ситуацій, розгортання яких може спричинити загрозу національній безпеці, їх наслідків, а також чинників, які можуть прискорити чи призупинити їх розгортання;
- запропонувати шляхи покращення та практичного застосування вказаної методики.

Аналіз досліджень і публікацій

Одними з ключових напрямків впровадження наукових досліджень, які сприятимуть підвищенню якості управлінських рішень, є розробка та впровадження сучасного спеціалізованого інформаційно-аналітичного апарату, основу якого становлять математичні моделі та адаптивні методи прогнозування, інтелектуальний аналіз даних, штучний інтелект, як уніфіковані підходи до генерації управлінських рішень у типових ситуаціях, так і індивідуальні сценарії, методи оптимізації використання ресурсів для досягнення цілей прийняття швидких та ефективних управлінських рішень, особливо в кризових ситуаціях, що протікають в умовах невизначеності, як у воєнний період, так і під час повоєнного відновлення, в рамках нових та існуючих ІТ-технологій. Розробленню систем підтримки прийняття рішень в управлінні соціально-економічними системами присвячені роботи П. І. Бідюка [1-9], О. П. Гожого [8], С. О. Довгого [10], В. І. Іваненка [11], Й. Корбуша [6, 12], О. Г. Наконечного [13], О. В. Нестеренка [14], О. М. Трофимчука [1-9], застосуванню методології системного аналізу – Н. Д. Панкратової та М. З. Згуровського [15], інформаційних технологій – роботи В. О. Васяніна [16], Є. В. Малахова [17], С. В. Цюцюри [18], штучного інтелекту – Ю. П. Зайченка [19, 20], В. І. Литвиненка [21], інтелектуального аналізу даних – М. М. Корабльова [22], Д. В. Ланде [23], забезпеченню надійності та ефективності функціонування комп'ютерних систем – роботи В. А. Пепеляєва [24], О. М. Хімича [25].

Незважаючи на значний доробок у сфері розроблення систем підтримки прийняття рішень, як в Україні, так і за кордоном, питанням розроблення інформаційних технологій, адаптованих до використання на різних рівнях прийняття рішень та управління, призначених для розв'язання задач запобігання виникненню негативних явищ, спричинених військовим конфліктом або соціально-економічною ситуацією, приділено мало уваги.

Невирішеним залишається питання забезпечення системного підходу до інформатизації аналітичної складової у процесі підтримки прийняття рішень під час обґрунтування моделі економічного та соціального розвитку громад та регіонів на поточний момент та на перспективу, зокрема, під час розроблення стратегій, програм, планів регіонального розвитку, визначення оптимального складу об'єднаних територіальних громад та галузевої структури економіки країни та регіону в період повоєнного відновлення, обґрунтування вибору моделі управління за урахування екологічних та суспільно-політичних чинників, можливості масштабування та модернізації існуючої інформаційної системи. Практично відсутні напрацювання стосовно методики формування цілісної системи інформаційно-аналітичного забезпечення соціально-економічного розвитку та суспільно-політичної стабільності.

Теоретичні основи дослідження

Для прогнозування соціально-економічних процесів розроблено багато різних методик застосування інтелектуального аналізу даних, математичного моделювання у системах підтримки прийняття рішень. Ці підходи представлені в роботах багатьох вітчизняних та закордонних вчених [1-25], це:

- регресійні моделі різних типів;
- моделі із включенням трендової складової та урахуванням залишків (різниця між реальним та прогнозним значенням), що включаються до моделі у вигляді ковзного середнього, за умови, що між залишками та цільовою змінною є кореляція;
- моделі класу експоненційного згладжування – Хольта, Брауна, Вінтерса (з адитивною або мультиплікативною сезонною складовою), з урахуванням дампа тренду та інші модифікації;
- нейронні мережі;
- узагальнені лінійні моделі;
- ймовірнісні моделі;
- нечіткі методи.

Однак, незважаючи на таке різноманіття моделей та методів, універсальної методики їх застосування для прогнозування соціально-економічних процесів на даний час немає. У багатьох публікаціях [1-8, 12-14, 16] щодо практичної реалізації короткострокового прогнозного моделювання відзначається, що хороші результати можна одержати за використання узагальнених лінійних моделей, експоненційних дисперсних та ймовірнісно-статистичних моделей у просторі станів. Структура моделі оцінюється наближено на підставі дослідження закономірностей протікання процесу, аналізу кореляційних функцій, візуального аналізу даних. При цьому вибирається кілька найбільш ймовірних структур (кандидатів). Потім обчислюються оцінки параметрів моделей-кандидатів, обирається краща з них, використовуючи відповідні статистичні характеристики якості моделей.

Лінійна модель у просторі станів для неперервного часу:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) + w(t), \\ z(t) &= H(t)x(t) + V(t),\end{aligned}$$

де $x(t)$ – вектор змінних стану розмірності n , $\dot{x}(t)$ – перша похідна вектору стану стосовно часу (швидкість зміни значень вектору стану); $A(t)$ – матриця динаміки об'єкта (суб'єкта) чи процесу вимірності $[n \times n]$, яка в загальному випадку залежить від часу; $B(t)$ – матриця коефіцієнтів керування вимірності $[n \times m]$, яка також може залежати від часу; $u(t)$ – вектор сигналів керування вимірністю $[m \times 1]$; $w(t)$ – вектор збурень стану вимірності $[n \times 1]$; $z(t)$ – вектор вимірів (експериментальних даних вимірності $[r \times n]$; $H(t)$ – матриця коефіцієнтів вимірів розмірності $[r \times n]$, $v(t)$ – вектор похибок (шумів) вимірності r .

Модель у просторі станів для дискретного часу [1, 3]:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Fx(k) + w(k), \\ z(k) &= A^T u(k) + H^T x(k) + v(k), \end{aligned}$$

де F , A^T , H^T – матриці параметрів розмірності $[n \times n]$, $[r \times p]$ і $[r \times n]$, відповідно; $u(k)$ – вектор регресорів (екзогенних змінних) розмірності $[p \times 1]$, $w(k)$, $v(k)$ – вектори збурень стану та шумів вимірів відповідно з такими статистичними характеристиками [1, 3]:

$$E[w(k)w^T(l)] = \begin{cases} Q, k=l \\ 0, k \neq l \end{cases}, \quad E[v(k)v^T(l)] = \begin{cases} R, k=l \\ 0, k \neq l \end{cases},$$

де $Q[n \times n]$, $R[r \times r]$ – коваріаційні матриці збурень та шумів вимірів відповідно. Послідовності $\{w(k)\}$, $\{v(k)\}$ некорельовані для будь-яких моментів часу [1, 3]:

$$E[w(k)v^T(l)] = 0, \forall k, l.$$

Враховуючи особливості досліджуваних процесів, для прогнозування їх розвитку доцільно використовувати узагальнені лінійні моделі, зокрема, Log-лінійні моделі, пробіт/логіт моделі, регресію Пуассона та інші, які являють собою сукупність методів побудови регресійних моделей та статистичної обробки даних. Всі етапи реалізації цієї методики супроводжуються використанням відповідних множин статистичних критеріїв, що дозволяє одержати прогнози хорошої якості на різних вибірках даних.

Для оцінювання невідомих параметрів моделей опрацьованими є байєсівські підходи [2, 5, 7], які доцільно використовувати і на коротких вибірках, що дуже актуально для соціально-економічних процесів, оскільки часто вони описуються статистичними показниками за 5-10 років. Однією з проблем під час визначення структури моделі є встановлення факту наявності нелінійностей у досліджуваному процесі та типу нелінійностей. Для розв'язання цієї проблеми використовується візуальний аналіз даних та формальні тести на наявність нелінійностей. Важливою проблемою при стратегічному управлінні соціально-економічними процесами і особливо аграрним виробництвом є необхідність оперативно виявити наявність відрізків із лінійним або нелінійним трендом, наявність гетероскедастичності та значних імпульсних викидів (екстремальних значень), які можуть суттєво впливати на якість моделі. Для цього, як правило, використовують тести на наявність нелінійності. Тест використовується у випадку, коли можна набрати кілька груп (реалізацій) спостережень для одного й того ж процесу.

У роботах [1, 4] описується застосування методики усереднення прогнозів за декількома моделями. Результати прийнятної якості дозволяє забезпечити використання адаптивного моделювання [1, 4].

Значною мірою проблема вибору оптимального методу прогнозного моделювання пов'язана з наявністю та складністю опрацювання невизначеностей різних типів: ситуаційної, статистичної, структурної, ймовірнісної тощо. Хоча більшість існуючих інформаційних систем підтримки прийняття рішень мають засоби, призначені для виявлення та прогнозування ризиків, викликаних саме такими невизначеностями, увага зосереджується на оцінюванні невизначеностей лише окремих типів. Перспективами вирішення цієї проблеми є впровадження інтелектуальних технологій та засобів обробки великих масивів структурованих та неструктурованих даних у системах підтримки прийняття рішень.

Адже одним із основних стримуючих факторів щодо активного застосування апарату математичного моделювання та інтелектуальних технологій у системах підтримки прийняття рішень в управлінні соціально-економічними процесами є проблема отримання вхідної інформації, якісно сформованої та в обсягах, достатніх для побудови математичних моделей та інтелектуального аналізу даних. Адже сформувати довгий часовий ряд макроекономічних, економічних та фінансових показників часто немає можливості. Тому, особі, що приймає рішення, доводиться стикатися з проблемою неповноти та неякісності вхідної інформації. Особливо це стосується періодів, коли відбувалися суспільно-політичні та структурні перетворення, економічні та фінансові кризи тощо, хоча набір показників, що опрацьовуються, може бути досить значним. Хоча на мікрорівні дана проблема пов'язана перш за все з відсутністю практики накопичення даних для потреб аналізу та прогнозування господарської та фінансової діяльності підприємств за період, більший ніж три-п'ять років. За таких обставин сформувати навчальну та валідаційну вибірки взагалі немає можливості.

В роботах [4, 26] запропоновано використовувати метод подібності процесів та його модифікації. За даного методу дослідження зосереджується на виявленні короткострокової та довгострокової динаміки у досліджуваних даних. Основною ідеєю цього методу є виявлення значимих патернів в даних [26].

Часто опрацювання коротких вибірок даних зводиться до вирішення проблеми зменшення розмірності моделей із використанням таких методів, як метод головних компонент та його модифікації, факторний аналіз, багатомірне шкалювання тощо, із подальшим використанням різних видів регресійних моделей, нейронних мереж тощо.

Для оброблення текстової інформації, як було запропоновано в роботах [23], доцільно застосовувати засоби інтелектуального аналізу текстів та такі методи штучного інтелекту, як Natural Language Processing (NLP) (для автоматичного вилучення інформації з текстів, новин, соціальних мереж), Knowledge Graphs (для побудови семантичних мереж впливів та подій), Data Fusion та Feature Engineering – для об'єднання гетерогенних джерел і формування єдиної бази ознак. Застосування штучного інтелекту стає в нагоді у задачах виявлення закономірностей, чинників, що спричиняють найбільший вплив на перебіг соціально-економічних процесів – Linear/Elastic Net, Random Forest Regressor, XGBoost; для розпізнавання подій та ризиків – методи Logistic Regression,

SVM, Decision Trees, CatBoost; для обґрунтування вибору стратегії реагування на події – Reinforcement Learning (RL); для прогнозування соціально-економічних подій – LSTM, GRU, TimesFM, Prophet.

Значна увага приділена також використанню ймовірнісних моделей [1, 4, 7], які, як показали дослідження [1-9], доцільно використовувати при розробці сценаріїв. Добре зарекомендували себе й методики сценарного аналізу, у яких використовуються когнітивні, мережі Байєса та експертне оцінювання. У роботах [1, 4, 12] пропонується використання когнітивного моделювання та експертного оцінювання для вибору найбільш значимих факторів, що якнайкраще описують структуру та поведінку досліджуваної системи з наступним їх використанням у процесі прийняття рішень, розробленні сценаріїв та прогнозів за цими сценаріями.

В задачах прийняття рішень, методики розв'язку яких ґрунтуються на аналітичних процедурах [9], логічних правилах та раціональному експертному оцінюванні, у багатьох випадках не отримують бажаного результату стосовно якості оцінок прогнозів. Тому виникає проблема системного використання альтернативних методів прогнозування для підвищення якості їх оцінок. Для вирішення цієї проблеми при розв'язанні задач прийняття рішень управління розвитком соціально-економічних систем на основі методології системного аналізу, яка передбачає ієрархічний аналіз процесів моделювання та прогнозування, урахування невизначеностей структурного параметричного та статистичного характеру, адаптування структури й параметрів моделей до змін у процесах та застосування альтернативних методів оцінювання параметрів моделей з метою пошуку кращих оцінок прогнозів за допомогою множини числових критеріїв їхньої якості, доцільно застосовувати методику, представлену у [2, 4-6].

Критерії оцінювання адекватності моделей підбираються в залежності від характеру досліджуваного процесу та обраної методики прогнозного моделювання. В залежності від цього використовують як окремі критерії якості, так і інтегральний критерій, а також порівняльні критерії. Враховуючи те, що при вирішенні задач прогнозного моделювання соціально-економічних процесів використовуються методи прогнозування на основі комбінацій моделей різних типів, для оцінювання якості таких прогнозів використовують різні варіанти усереднення прогнозів та методи оптимізаційного типу.

Результати дослідження

Архітектура пропонованої системи призначена для вирішення задач прийняття рішень в умовах невизначеності, тому обов'язковим компонентом є керуюча частина із зворотним зв'язком (рис. 1).

Як можна побачити із наведеної схеми, існує можливість покращення якості прогнозів за рахунок застосування адаптивної схеми моделювання та розширення функціоналу блоку попередньої підготовки даних.

Пропонований метод був апробований на декількох практичних задачах.

Зокрема, для дослідження перспектив повоєнного відновлення була використана пропонована методика, реалізована у декілька кроків. На першому кроці окреслено просторові (територія України: макро-, мезо-, мікрорівні), функціональні (галузі національної економіки та фінансовий сектор згідно з класифікацією видів економічної діяльності) та часові межі (2015-2024 рр.)

досліджуваної системи. Дані, використані для аналізу, розміщені у відкритих джерелах – це дані з Порталу відкритих даних [27], дані Державної служби статистики України [28], Національного банку України [29], Міністерства фінансів України [30], Пенсійного фонду України [31], а також показники, представлені на сайтах Світового банку [32], Організації Об'єднаних Націй [33], Європейського банку реконструкції та розвитку [34], Європейського парламенту [35] тощо.

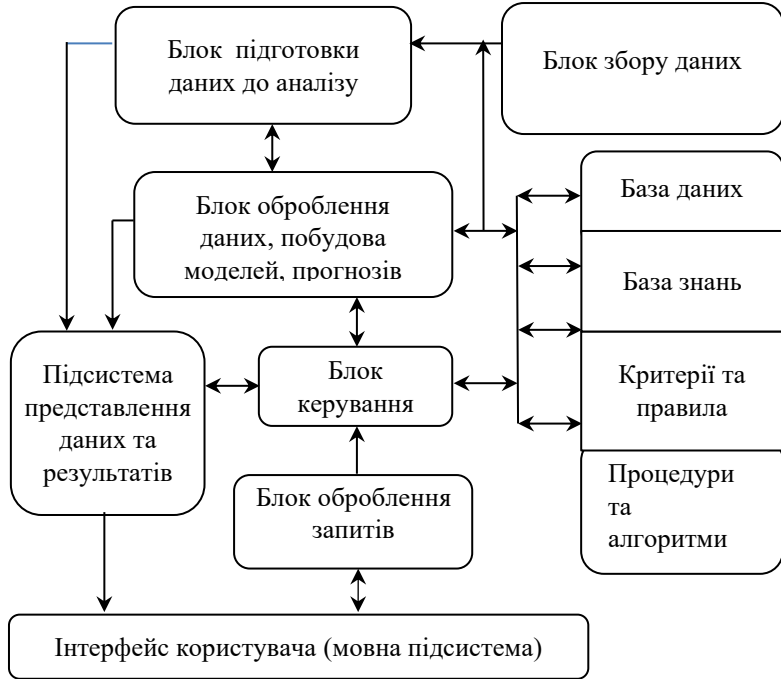


Рисунок 1. Архітектура системи підтримки прийняття рішень

На другому кроці виконано SWOT, PEST, SPACE, кореляційний аналіз, доповнені матрицею впливу, яка дозволила поєднати кількісні показники, зокрема макроекономічні показники, кореляційні залежності та результати експертних оцінювань. На базі матриці впливу побудовано мережевий граф, у якому вузли – це галузі національної економіки й макропоказники, а ребра – впливи, значення яких відповідає значенню абсолютної сили понад 1,0. Далі виявляються сфери, що впливають на загальну стійкість системи – це фінанси та транспорт, і які потребують моніторингу та керування. На третьому кроці побудовано базовий, оптимістичний та песимістичний сценарії. Наприклад, базовий сценарій (табл. 1) передбачає, що активні бойові дії припинені, при повільному відновленні інфраструктури та помірному темпі реформ. За збереження нинішнього рівня міжнародної допомоги й стабільної світової кон'юнктури очікується щорічне зростання ВВП на 3 %, інфляція 8–10 %, поступове зниження безробіття до 12 % і курс гривні в діапазоні 40–45 грн/\$.

Таблиця 1. Базовий сценарій

Припущення	активні бойові дії припинені, інфраструктура відновлюється, хоча й повільно; реформи тривають у нинішньому темпі, але є пригальмовування із-за бюрократизації впровадження змін; міжнародна допомога на високому рівні (на рівні траншів, отримуваних у період військових дій), потік прямих іноземних інвестицій помірний; на світовому ринку сприятлива цінова кон'юнктура на головні експортні товари – зерно та метал (ціни на зерно й метал залишаються близько до середньорічних 2022-2023 рр. рівнів).
Макроекономічні показники (щорічно)	темپ приросту ВВП – 3 %; індекс споживчих цін не перевищує 10–15 %; безробіття знижується з 15 % до 12 %; дефіцит бюджету 15-20 % ВВП; курс національної валюти стійкий – коливається в діапазоні 40–45 грн/дол.
Секторальні ефекти	промисловість: відновлюється, виробництво зростає на 60 % або на 20 % від довоєнного рівня, зростання не менше 2 % щорічно; урожайність сільськогосподарських культур стало висока, експорт +1,5-2 % щорічно; ІТ-сектор зростає на 5-8 % на рік; сфера будівництва та реконструкції – відбудова 30 % зруйнованих об'єктів до 2027 р.

Побудовані сценарії дають можливість узагальнити фактори, ранжувати ключові компоненти та їх зв'язки. На четвертому кроці виконується моделювання нелінійних зв'язків, між факторами процесу, що досліджується. Для побудови топології мережі Байєса використовується метод Greedy Thick Thining, для обчислення значень ймовірностей по мережі – метод K2. Попередньо, дані були підготовлені, а саме від інтервальних значень перейшли до бінарних, що моделюють два стани – ріст або падіння значення змінної у момент часу t , по відношенню до значення у попередній момент часу $t-1$. Фрагмент мережі Байєса представлений на рис. 2.

Отримана мережа Байєса має похибку класифікації у 15 %, тобто в 85 % випадків мережа вірно моделює інвестиційний сценарій, а саме, зміну валового нагромадження капіталу, залежно від значень станів інших вершин мережі – макроекономічних показників.

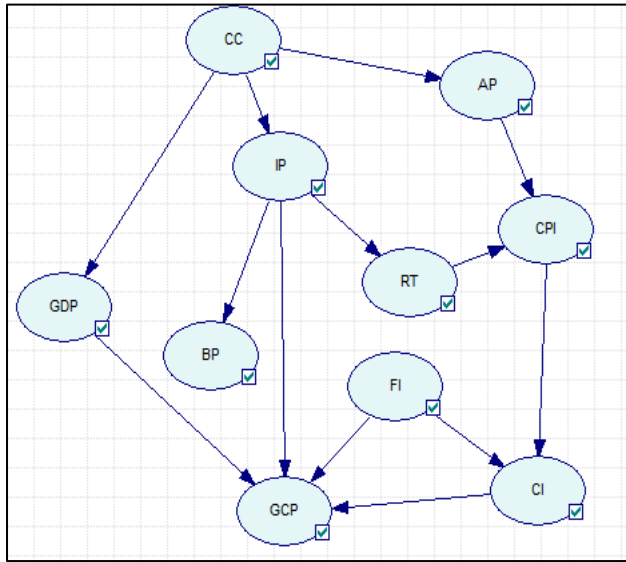


Рисунок 2. Фрагмент топології мережі Байєса, що моделює базовий сценарій повоєнного відновлення

Загалом, моделювання сценаріїв на основі мереж Байєса показало, що суттєве збільшення значення цільової змінної GCP (валове нагромадження капіталу) досягається в першу чергу за рахунок зростання значень параметрів моделі, таких як GDP (валовий внутрішній продукт), RT (оборот роздрібної торгівлі), IP (обсяг реалізованої промислової продукції, товарів та послуг) та AP (продукція сільського господарства).

На п'ятому кроці за побудованими сценаріями здійснюється прогнозування різних цільових змінних на різних часових перерізах. Наприклад, для «інвестиційного» сценарію для довгострокового прогнозування валового нагромадження основного капіталу було застосовано методи штучного інтелекту – нейронні мережі. Побудована модель має статистичні характеристики: статистика R-квадрат дорівнює 0,93, а середня абсолютна процентна похибка прогнозу на тренінговому наборі даних MAPE дорівнює 7,39 %.

На рис. 3 представлені результати довгострокового прогнозування валового внутрішнього продукту та валового нагромадження основного капіталу за різними сценаріями на період до 2040 року. Для побудови моделі нейронної мережі було використано програмне забезпечення SAS Enterprise Miner, з налаштуваннями аналітичних компонентів мережі: вхідний шар містить усі змінні, що використані для побудови сценаріїв, включаючи лагові змінні першого порядку; один прихований шар, що містить п'ять прихованих вершин (обрано аналітичним шляхом); використовується функція перетворення вхідних змінних softmax; кількість ітерацій навчання – двадцять.

Як видно з рис. 3, відновлення економіки та позитивна економічна динаміка на перспективу до 2040 року можуть бути досягнуті за умови сталого зростання залучення інвестицій та збереження співвідношення промисловість-сільське господарство на довоєнному рівні.

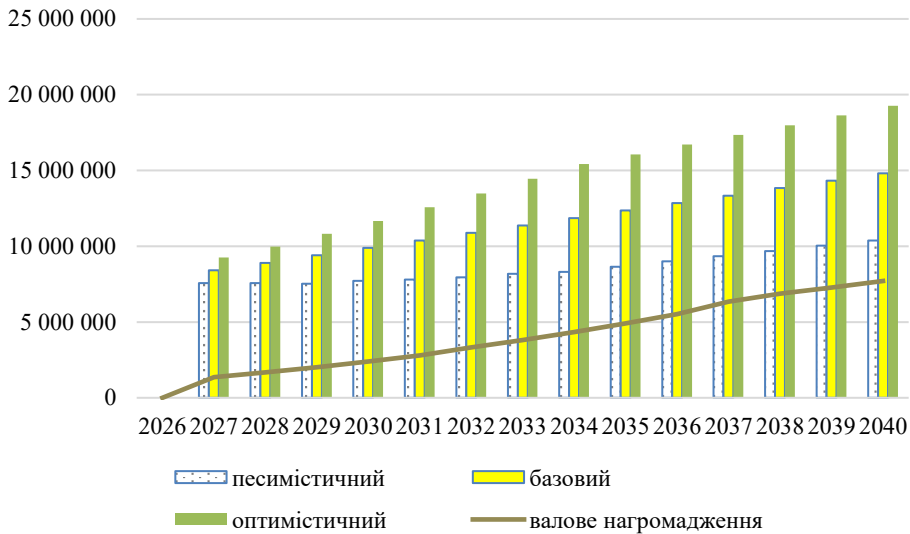


Рисунок 3. Результати довгострокового прогнозування макроекономічної динаміки за різними сценаріями інвестиційного забезпечення до 2040 року

Якість одержаних результатів прогнозного моделювання свідчить про перспективність застосування запропонованої методики для різних соціально-економічних процесів. Також запропонований підхід має переваги щодо автоматизації основних процесів попередньої обробки даних та прогнозного моделювання.

Висновки

Розроблена інформаційна технологія заснована на системному використанні інструментальних засобів і методів, які вирішують завдання аналізу, моделювання, прогнозування, підтримки прийняття рішень в управлінні соціально-економічними системами у період повоєнного відновлення, забезпечує обґрунтування та аналіз ефективності пропонуванних варіантів рішень та сценаріїв розвитку подій. Математичні моделі, засоби інтелектуального аналізу даних, штучний інтелект, пропонувані в роботі, становлять основу інформаційно-аналітичної технології для забезпечення прийняття рішень у сфері національної безпеки і оборони. Їх використання посилює інформаційно-аналітичну та прогностичну функції служб міністерств та відомств, установ, організацій, органів місцевого самоврядування, зокрема підвищить якість збирання первинної інформації, сформує передумови для створення системи моніторингу загроз національній безпеці України, що охопить різні рівні державного управління; забезпечить комплексне оцінювання стану національної економіки, покращить інформаційно-аналітичне забезпечення стратегічного планування; дозволить сформувати єдиний інформаційний простір державного управління національною безпекою та обороною. Запропоновані математичні моделі, інструменти інтелектуального аналізу даних, штучний інтелект, сценарії, когнітивні моделі та методи прогнозування та підтримки прийняття рішень

можуть використовуватися залежно від типу й механізму вибору та формулювання конкретної задачі, як окремо – для розв’язування окремих підзадач, так і системно – для вирішення загальної проблеми. Результати виконання роботи дозволять удосконалити систему підтримки прийняття рішень в сфері національної безпеки та оборони як складової національної системи стійкості та інформаційно-аналітичне забезпечення процесу прийняття рішень, аналізу перебігу подій та результатів прийнятого рішення відповідними структурами органів державного управління та місцевого самоврядування, зокрема, проаналізувати поточну ситуацію, потенційні та реальні загрози та кризові ситуації (зокрема, визначити їх прояви), розробити типові рішення, сценарії реагування на загрози, критичні ситуації, катастрофи тощо, прогнозувати спроможності, необхідні для їх подолання.

В подальшому система може бути розширена за рахунок додавання нових математичних моделей та їх ансамблів, засобів обробки геопросторової інформації та штучного інтелекту, зокрема, технології Human-in-loop.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Trofymchuk, O. M., Bidiuk, P. I., Prosiankina-Zharova, T. I., & Terentiev, O. M. (2019). *Decision support systems for modelling, forecasting and risk estimation: Monography*. Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing.
2. Trofymchuk, O. M., Bidiuk, P. I., Prosiankina-Zharova, T. I., & Terentiev, O. M. (2023). Bayesian data analysis in modeling and forecasting nonlinear nonstationary financial and economic processes. *Проблеми керування та інформатики*, 4, 71–83. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2023-4-6>
3. Бідюк, П. І., Тимошук, О. Л., Коваленко, А. Є., & Коршевнік, Л. О. (2022). *Системи і методи підтримки прийняття рішень: Підручник для здобувачів ступеня магістра за спеціальністю 124 Системний аналіз*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського.
4. Trofymchuk, O., Bidiuk, P., Terentiev, O., & Klymenko, V. (2024). The methodology for adaptive modeling and forecasting nonlinear and nonstationary processes. *Міжнародний науково-технічний журнал «Проблеми керування та інформатики»*, 1, 63–79.
5. Kuznietsova, N. V., Trofymchuk, O. M., Bidiuk, P. I., Terentiev, O. M., & Levenchuk, L. B. (2021). Bayesian modelling of risks of various origin. *KPI Science News*, 4, 7–18. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.4.251684>
6. Korbicz, J., Trofymchuk, O., Bidiuk, P., Kuznietsova, N., Terentiev, O., & Prosiankina-Zharova, T. (2021). Probabilistic modeling of risks of different origin. *Modern Information Technologies for Environmental Safety Management, Nature Management, Emergency Measures*, October 7, Kyiv, Ukraine, 29–42.
7. Trofymchuk, O. M., Bidiuk, P. I., Prosiankina-Zharova, T. I., & Terentiev, O. M. (2022). Bayesian data analysis in modeling and forecasting nonlinear nonstationary financial and economic processes. *XXI Міжнародна науково-практична конференція “Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток,”* 14–16 листопада 2022 р., м. Київ, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України. Київ: ТОВ «Видавництво «Юстон».
8. Bidiuk, P. I., Korshevnyuk, L. O., Gozhyi, O. P., Kalinina, I. O., Prosyankina-Zharova, T. I., & Terentiev, O. M. (2019). Modeling and forecasting financial and economic processes with decision support system. *Наукові вісті КПІ*, 5–6, 7–17. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.5-6.176835>
9. Довгий, С. О., Бідюк, П. І., & Трофимчук, О. М. (2014). *Системи підтримки прийняття рішень на основі статистично-ймовірнісних методів*. Київ: Логос.

10. Довгий, С. О., Копійка, О. В., & Козлов, О. С. (2023). Передача інформації в автоматизованих системах спеціального призначення. *Екологічна безпека та природокористування*, 1(45), 76–90. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.76-90>
11. Іваненко, В. І. (2015). Очікувана корисність у ситуаціях прийняття рішень з випадковими у широкому сенсі наслідками. *Системні дослідження та інформаційні технології*, 2, 51–58.
12. Korbicz, J., Bidyuk, P., Kuznietsova, N., Terentiev, O., & Prosiankina-Zharova, T. (2020). Multivariate distribution model for financial risks management. *The 9th International Conference "Information Control Systems & Technologies" (ICST2020)*, Odessa, Sept. 24–26, (pp. 416–429). CEUR Workshop Proceedings.
13. Nakonechnyi, O., & Podlipenko, Y. (2021). *Guaranteed estimation problems in the theory of linear ordinary differential equations with uncertain data*. River Publishers Series in Mathematical and Engineering Science.
14. Поліщук, В. Б., Нетесін, І. Є., & Нестеренко, О. В. (2019). *Інформаційні технології в управлінні оборонними ресурсами: методологічний контекст та приклади практичної реалізації*. Київ: УкрНЦ РІТ.
15. Панкратова, Н. Д. (2018). *Системний аналіз. Теорія та застосування*. Київ: Наукова думка.
16. Васянін, В. О., Трофимчук, О. М., & Ушакова, Л. П. (2025). Методологія математичного моделювання перспективного розвитку вузлів і транспортних маршрутів у багатопродуктовій ієрархічній мережі. II. Експериментальні дослідження. *Кибернетика та системний аналіз*, 61(2), 78–98. <https://doi.org/10.34229/KCA2522-9664>
17. Bocharova, M., & Malakhov, E. (2024). Improving information theory of context-aware phrase embeddings in HR domain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 53–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313970>
18. Цюцюра, С., Гнатченко, Д., & Фібрук, Р. (2024). Алгоритм розроблення веб-орієнтованого застосунку цифровізації підприємства. *Управління розвитком складних систем*, 59, 235–241. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.235-241>
19. Zgurovsky, M. Z., & Zaychenko, Y. P. (2019). *Big Data: Conceptual analysis and applications*. Switzerland: International Publishing.
20. Zgurovsky, M. Z., & Zaychenko, Y. P. (2016). *The fundamentals of computational intelligence: System approach*. Switzerland: Springer International Publishing.
21. Mashkov, V., Lytvynenko, V., & Lurie, I. (2023). Modeling and simulating mutual testing in complex systems by using Petri nets. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 15(6), 81–93. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2023.06.07>
22. Korablyov, M., & Lutsyy, S. (2022). System-information models for intelligent information processing. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 3(21), 26–38. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.026>
23. Zgurovsky, M., Lande, D., Boldak, A. et al. (2021). Linguistic analysis of Internet media and social network data in the problems of social transformation assessment. *Cybernetics and Systems Analysis*, 57(2), 228–237. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00348-8>
24. Pepelyaev, V. A., Golodnikov, A. N., & Golodnikova, N. A. (2022). A new method of reliability optimization in the classical problem statement. *Cybernetics and Systems Analysis*, 58(6), 917–922. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00525>
25. Петрик, М. Р., Бойко, І. В., Хіміч, О. М., & Петрик, М. М. (2021). Високопродуктивні суперкомп'ютерні технології моделювання та ідентифікації складних нанопористих кіберсистем зі зворотними зв'язками для n-компонентної компетитивної адсорбції. *Кибернетика і системний аналіз*, 57(2), 170–183. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00357>
26. Leonard, M., Sloan, J., Lee, J., & Elsheimer, B. (2007). *An introduction to similarity analysis using SAS*. Proceedings of the SAS Global Forum. <https://support.sas.com/rnd/app/ets/papers/similarityanalysis.pdf>

27. Набори даних. (n.d.). <https://data.gov.ua/dataset>. <https://data.gov.ua>
28. Публікації. (n.d.). *Державна служба статистики України*. <https://www.ukrstat.gov.ua>
29. Набори даних. (n.d.). *Національний банк України*. <https://bank.gov.ua/ua/statistic>
30. Набори даних. (n.d.). *Міністерство фінансів України*. Статистичний збірник. <https://mof.gov.ua/uk/statistichnij-zbirnik>
31. Набори даних. (n.d.). *Пенсійний фонд України*. <https://www.pfu.gov.ua/statystyka>
32. Data Sets. (n.d.). *World Bank Open Data*. <https://data.worldbank.org>
33. United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2016). *Compendium of innovative practices in public governance and administration for sustainable development*. UN-iLibrary. <https://doi.org/10.18356/4bbb6eba-en>
34. Data sets. (n.d.). *The European Bank for Reconstruction and Development*. <https://www.ebrd.com/home.html>
35. Data sets. (n.d.). *European Parliament*. <https://www.europarl.europa.eu/portal/en>

Стаття надійшла до редакції 13.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 09.09.2025

REFERENCES

1. Trofymchuk, O. M., Bidiuk, P. I., Prosiankina-Zharova, T. I., & Terentiev, O. M. (2019). *Decision support systems for modelling, forecasting and risk estimation: Monography*. Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing.
2. Trofymchuk, O. M., Bidiuk, P. I., Prosiankina-Zharova, T. I., & Terentiev, O. M. (2023). Bayesian data analysis in modeling and forecasting nonlinear nonstationary financial and economic processes. *Problemy keruvannya ta informatyky*, 4, 71–83. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2023-4-6> [in Ukrainian].
3. Bidjuk, P. I., Tymoshchuk, O. L., Kovalenko, A. Je., & Korshevnyuk, L. O. (2022). *Systemy i metody pidtrymky pryjnjattja rishen': Pidruchnyk dlja zdobuvachiv stupenja magistra za special'nistju 124 Systemnyj analiz*. Kyiv: KPI im. Igorja Sikors'kogo [in Ukrainian].
4. Trofymchuk, O., Bidiuk, P., Terentiev, O., & Klymenko, V. (2024). The methodology for adaptive modeling and forecasting nonlinear and nonstationary processes. *Problemy keruvannya ta informatyky*, 1, 63–79.
5. Kuznietsova, N. V., Trofymchuk, O. M., Bidiuk, P. I., Terentiev, O. M., & Levenchuk, L. B. (2021). Bayesian modelling of risks of various origin. *KPI Science News*, 4, 7–18. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.4.251684>
6. Korbicz, J., Trofymchuk, O., Bidiuk, P., Kuznietsova, N., Terentiev, O., & Prosiankina-Zharova, T. (2021). Probabilistic modeling of risks of different origin. In *Modern Information Technologies for Environmental Safety Management, Nature Management, Emergency Measures* (pp. 29–42). Kyiv, Ukraine.
7. Trofymchuk, O. M., Bidiuk, P. I., Prosiankina-Zharova, T. I., & Terentiev, O. M. (2022). Bayesian data analysis in modeling and forecasting nonlinear nonstationary financial and economic processes. In *XXI Mizhnarodna nauково-praktychna konferencija: "Informacijno-komunikacijni tehnologii' ta stalij rozvytok"* (pp. 14–16). Kyiv: TOV "Vydavnytstvo Juston" [in Ukrainian].
8. Bidiuk, P. I., Korshevnyuk, L. O., Gozhyi, O. P., Kalinina, I. O., Prosiankina-Zharova, T. I., & Terentiev, O. M. (2019). Modeling and forecasting financial and economic processes with decision support system. *Naukovi visti KPI*, 5–6, 7–17. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.5-6.176835>
9. Dovgyj, S. O., Bidjuk, P. I., & Trofymchuk, O. M. (2014). *Systemy pidtrymky pryjnjattja rishen' na osnovi statystychno-jmovirnisnyh metodiv*. Kyiv: Logos [in Ukrainian].

10. Dovgyj, S. O., Kopijka, O. V., & Kozlov, O. S. (2023). Peredacha informacii' v avtomatyzovanyh systemah special'nogo pryznachennja. *Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannja*, 1(45), 76–90. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.76-90> [in Ukrainian].
11. Ivanenko, V. I. (2015). Ochikuvana korysnist' u sytuacijah pryjnattja rishen' z vypadkovyvy u shyrokomu sensi naslidkamy. *Systemni doslidzhennja ta informacijni tehnologii'*, 2, 51–58 [in Ukrainian].
12. Korbicz, J., Bidyuk, P., Kuznietsova, N., Terentiev, O., & Prosiiankina-Zharova, T. (2020). Multivariate distribution model for financial risks management. In *The 9th International Conference "Information Control Systems & Technologies" (ICST2020)* (pp. 416–429). CEUR Workshop Proceedings.
13. Nakonechnyi, O., & Podlipenko, Y. (2021). *Guaranteed estimation problems in the theory of linear ordinary differential equations with uncertain data*. River Publishers.
14. Polishchuk, V. B., Netesin, I. Je., & Nesterenko, O. V. (2019). *Informacijni tehnologii' v upravlinni oboronnyvy resursamy: metodologichnyj kontekst ta pryklady praktychnoi realizacii'*. Kyiv: UkrNC RIT [in Ukrainian].
15. Pankratova, N. D. (2018). *Systemnyj analiz. Teorija ta zastosuvannja*. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
16. Vasjanin, V. O., Trofymchuk, O. M., & Ushakova, L. P. (2025). Metodologija matematychnogo modeljuvannja perspektyvnogo rozvytku vuzliv i transportnyh marshrutiv u bagatoproduktovij ijerarhichnij merezhi. II. Eksperymental'ni doslidzhennja. *Kibernetyka ta systemnyj analiz*, 61(2), 78–98. <https://doi.org/10.34229/KCA2522-9664> [in Ukrainian].
17. Bocharova, M., & Malakhov, E. (2024). Improving information theory of context-aware phrase embeddings in HR domain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 53–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313970>
18. Cjucjura, S., Gnatchenko, D., & Fibruk, R. (2024). Algorytm rozroblennja veb-orijentovanogo zastosunku cyfrovizacii' pidpryjemstva. *Upravlinnja rozvytkom skladnyh system*, 59, 235–241. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.235-241> [in Ukrainian].
19. Zgurovsky, M. Z., & Zaychenko, Y. P. (2019). *Big data: Conceptual analysis and applications*. Switzerland: International Publishing.
20. Zgurovsky, M. Z., & Zaychenko, Y. P. (2016). *The fundamentals of computational intelligence: System approach*. Switzerland: Springer International Publishing.
21. Mashkov, V., Lytvynenko, V., & Lurie, I. (2023). Modeling and simulating mutual testing in complex systems by using Petri nets. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 15(6), 81–93. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2023.06.07>
22. Korablyov, M., & Lutskey, S. (2022). System-information models for intelligent information processing. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 3(21), 26–38. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.026>
23. Zgurovsky, M., Lande, D., Boldak, A., et al. (2021). Linguistic analysis of internet media and social network data in the problems of social transformation assessment. *Cybernetics and Systems Analysis*, 57(2), 228–237. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00348-8>
24. Pepelyaev, V. A., Golodnikov, A. N., & Golodnikova, N. A. (2022). A new method of reliability optimization in the classical problem statement. *Cybernetics and Systems Analysis*, 58(6), 917–922. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00525>
25. Petryk, M. R., Bojko, I. V., Himich, O. M., & Petryk, M. M. (2021). Vysokoproduktyvni superkomp'juterni tehnologii' modeljuvannja ta identyfikacii' skladnyh nanoporystyh kibersystem zi zvorotnyvy zv'jazkamy dlja n-komponentnoi' kompetytyvnoi' adsorbicii'. *Kibernetyka i systemnyj analiz*, 57(2), 170–183. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00357> [in Ukrainian].
26. Leonard, M., Sloan, J., Lee, J., & Elsheimer, B. (2007). An introduction to similarity analysis using SAS. *Proceedings of the SAS Global Forum 2007* (22 p.). <https://support.sas.com/rnd/app/ets/papers/similarityanalysis.pdf>
27. Nabory danyh. (n.d.). <https://data.gov.ua/dataset>. <https://data.gov.ua> [in Ukrainian].

28. Publikacii'. (n.d.). *Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy*. <https://www.ukrstat.gov.ua> [in Ukrainian].
29. Nabory danyh. (n.d.). *Nacional'nyj bank Ukrainy*. <https://bank.gov.ua/ua/statistic> [in Ukrainian].
30. Nabory danyh. (n.d.). *Ministerstvo finansiv Ukrainy. Statystychnyj zbirnyk*. <https://mof.gov.ua/uk/statystichnij-zbirnik> [in Ukrainian].
31. Nabory danyh. (n.d.). *Pensijnyj fond Ukrainy. Statystyka*. <https://www.pfu.gov.ua/statystyka> [in Ukrainian].
32. Data Sets. (n.d.). *World Bank Open Data*. <https://data.worldbank.org>
33. United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2016). *Compendium of innovative practices in public governance and administration for sustainable development*. <https://doi.org/10.18356/4bbb6eba-en>
34. Data Sets. (n.d.). *European Bank for Reconstruction and Development*. <https://www.ebrd.com/home.html>
35. Data Sets. (n.d.). *European Parliament*. <https://www.europarl.europa.eu/portal/en>

The article was received 13.06.2025 and was accepted after revision 09.09.2025

Трофимчук Олександр Миколайович

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

Бідюк Петро Іванович

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

Терентьєв Олександр Миколайович

д.т.н., доцент, провідний науковий співробітник
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Адреса робоча: 0186, м. Київ, Чоколівський бульв., 13
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-1753> **e-mail:** o.terentiev@gmail.com

Просянкін-Жарова Тетяна Іванівна

к.е.н., доцент, старший науковий співробітник
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Адреса робоча: 0186, м. Київ, Чоколівський бульв., 13
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9623-8771> **e-mail:** tpuman@gmail.com

УДК 533.6.013.42

Iurii Kaliukh¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7240-4934> **e-mail:** kalyukh2002@gmail.com

Andrey Shokarev², Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1713-530X> **e-mail:** unaryand@gmail.com

Sergii Kurash², Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-5810-9258> **e-mail:** zuvs2004@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

²State Enterprise "The State Research Institute of Building Constructions", Kyiv, Ukraine

APPLYING MODERN CONSTRUCTION 4.0 TECHNOLOGY TO DAMAGED BUILDINGS

Abstract. *The work purpose was to conduct a comparative analysis investigating the damage caused to a high-rise building (HRB) under dynamic impacts of two types: periodic industrial explosions at the iron ore quarry of «UGOK» mining and processing plant in Kryvyi Rih and a rocket strike on HRB in Kyiv on February 26, 2022. fib bulletin 59 was used as the basis. The study demonstrates how the life cycle curve of HRB transforms under periodic dynamic impacts and a one-time combat action influence compared to the standard fib bulletin 59 curve. The applied methods included visual and instrumental inspection of buildings using non-destructive testing methods, geodetic and vibration instruments with IoT for refining initial-boundary conditions during the creation of the HRB Construction 4.0 (Digital Twins). Therefore, its experimental verification was conducted. The calculation package LIRA-CAD was used for calculations. It can be noticed while comparing vibration displacement projections at identical points of buildings 6-A and 6-B. Under current conditions, the operational lifespan of 6-A decreases by approximately $\Delta T \approx 30$ years. To restore the building to a safe technical state, allow residents to return, and extend its operational lifespan beyond the current estimate (≈ 70 years), comprehensive restoration work is required. A methodology for using a Construction 4.0 (Digital Twins) as an element of the straightening control system has been developed. It allows for the adjustment of tilt-eliminating works based on the current monitoring and calculation of the digital spatial model of the multi-story building and the stress-strain state of the "reshaped soil base – tilted strip foundation" system. The successful implementation of the methodology is also demonstrated. A multi-story building in Zaporizhzhia, Ukraine, was straightened without relocating the residents or shutting down essential utilities (elevators, water supply, etc.). Three stages of Digital Twin (Construction 4.0) formation for the specified objects are considered: formation of a Digital Model; formation of Digital Twins, when methods and means of non-destructive testing are involved, and the last stage – Digital Twin, when the results and recommendations of the results of the first two stages are taken into account when reconstructing or restoring the original physical object for the Digital Twin.*

Keywords: *Construction 4.0, Digital Twin, high-rise building, stress-deformed state, forecasting, Internet of Things.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.50-60>

Introduction

The aging of building structures over time is an unavoidable phenomenon faced by humanity throughout history. The general evolution of a building's life cycle – from commissioning to demolition – is depicted in Figure 1 from fib Bulletin 59 [1]. However, deviations in the rate of progression along this curve frequently occur, either accelerating or decelerating. Examples of decelerated degradation include ancient monuments, such as the Pantheon [2] and the Colosseum in Rome, which have not only survived but continue to serve as heavily utilized sites, welcoming numerous visitors daily.

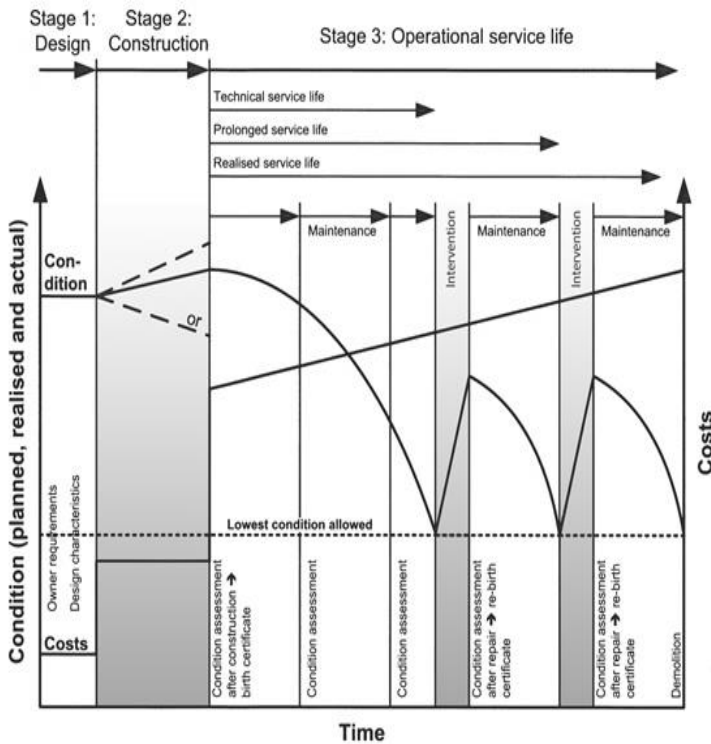


Fig. 1. The entire service life of a building from "birth" to "death"

The latter scenarios often fall within the domain of forensic engineering. Many scientists, engineers, and builders worldwide have addressed these challenges to varying extents. Notable contributions are documented in works [3], which were considered in this study for a comparative analysis of the life cycle degradation of buildings due to periodic industrial explosions at the “PivdGZK” quarry in Kryvyi Rih and a rocket strike on a high-rise building in Kyiv on February 26, 2022.

Impact of Industrial Explosions at the Open-Pit Iron Ore Quarry of the Southern Mining and Processing Plant on Surrounding Buildings

The open-pit iron ore quarry of “PivdGZK” in Kryvyi Rih was established in 1952 and has reached a depth of approximately 250 m. At the surface level, mining operations are conducted within an area delineated by an oval with major and minor

axes measuring 4 km and 3 km, respectively. The explosion safety zone is defined as 700 m. The boundary of the residential areas in the Inhulets District of Kryvyi Rih, located east and southeast of the quarry, lies 800–900 m from the eastern edge of the pit. Consequently, when blasting occurs on the upper levels of the quarry, the explosion safety zone comes extremely close to the residential areas. The dynamic impacts on buildings within the explosion safety zone are periodic. Until recently, blasting operations at “PivdGZK” were conducted every two weeks, with the maximum amount of explosives used per blast ranging from 490 to 652 tons during the observation period from 2008 to 2012. Buildings selected for monitoring during the blasting activities included: The Church of the Nativity of the Virgin Mary (hereafter referred to as the “Church”) located at 14 Obrucheva Street (Figures 2), Middle School No. 40 on Sestroritska Street (Figure 3), The Youth Creativity Center (hereafter referred to as the “Center”). These structures are sites of mass gatherings and must meet heightened safety requirements, making their comprehensive analysis critically important [4-7].



Fig. 2. Church's reaction to the explosion in the quarry. Top – cracks in the brick vault of the Church. Bottom – the priest pointing out vertical cracks on his house located within the Church's premises



Fig. 3. Visual inspection of School No. 40 revealed cracks up to 0.05 m wide in external load-bearing walls. Crack gauges and vibration monitoring are required to assess seismic and explosion-related impacts

The Center in Kryvyi Rih was selected for detailed experimental and theoretical investigations, as well as for assessing its residual lifespan, partly due to the availability of design documentation. The building was designed in 1960 and constructed during the 1970s, a period of intensive iron ore extraction at the quarry. Consequently, the

structure was subjected to seismic impacts from explosions during its construction phase (Figure 7) [4, 5]. The comprehensive methodology for determining the residual lifespan of buildings in zones affected by dynamic impacts includes the following steps: 1) visual inspection of the building to document damage; 2) determination of the physical and mechanical properties of the building's structural elements and dynamic measurements to assess its response and identify natural frequencies (required for verification of the analytical model); 3) development of a graphical model of the building incorporating findings from Step 1 (Figure 5) [5, 6]; 4) identification of the analytical model; 5) dynamic stress-strain state calculations for the building; 6) assessment of the structural risk; 7) construction of the building's life cycle curve and quantitative evaluation of its residual lifespan. The detailed description of Steps 1–7 can be found in the dissertation by V. Dunin under the scientific supervision of Prof. Iu. Kaliukh [4]. The results of the Center's resource depletion due to regular industrial explosions are shown in Figure 4 [4].

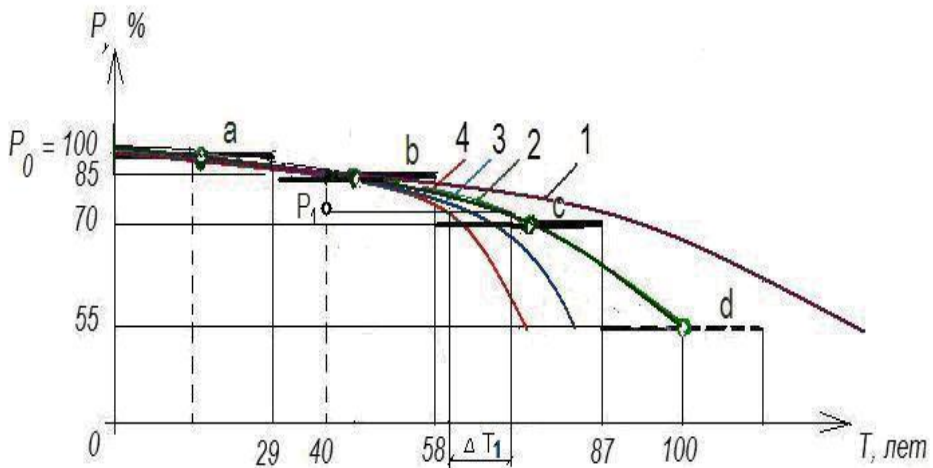


Fig. 4. Curves of bearing capacity changes: 1 – for a specific structural element under dynamic impacts; 2 – for the building as a whole without seismic impacts; 3 – for the building as a whole under dynamic impacts without damage; 4 – for the building as a whole under dynamic impacts with damage; a – building in normal condition; b – building in satisfactory condition; c – building unfit for normal operation; d – building in an emergency condition; P1 – technical condition of the Center building at the time of investigation

The reduction in the building's lifespan is determined by the loss of load-bearing capacity. The calculated age of the building differs from the actual age by approximately 30 years. Observed defects during visual inspections, combined with analytical and experimental data, indicate that the overall technical condition of the Center can be classified as unfit for normal use in the fore-seeable future. As internal defects in the building accumulate, the risk of failure in its reinforced concrete load-bearing structures will increase, accelerating aging and further reducing its lifespan.

Impact of a Missile Strike on a High-Rise Building and the Reduction of Its Residual Lifespan

During the war, Russia has destroyed or damaged over 210,000 buildings in Ukraine, according to an analysis conducted by The New York Times in collaboration with remote sensing experts Corey Sher from the Graduate Center of the City University of New York and Jamon Van Den Hoek from Oregon State University (Figure 5) [8].

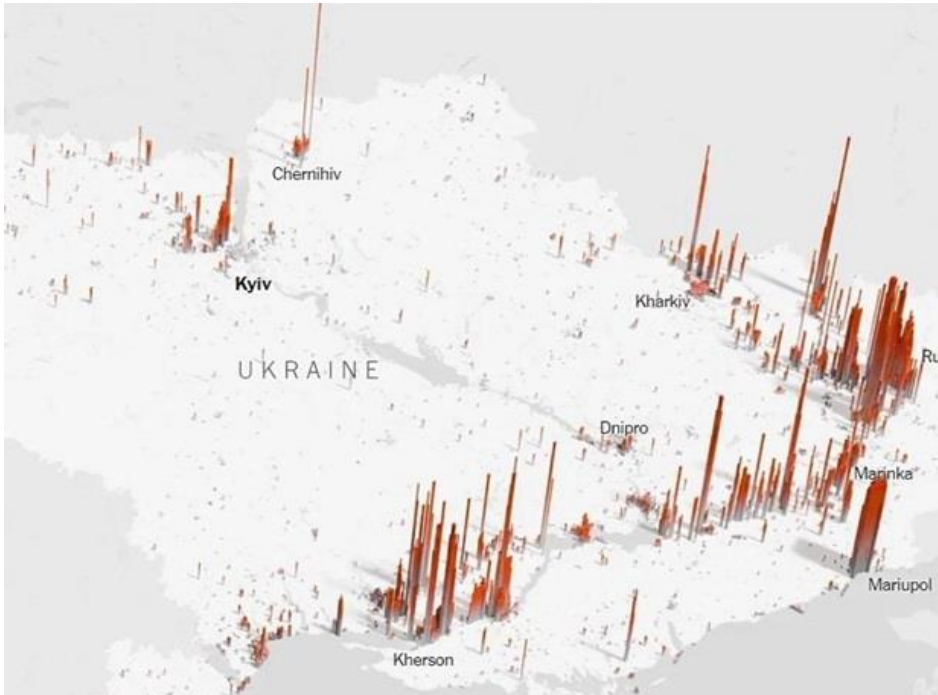


Fig. 5. Visualization on the map of Ukraine of the analysis results for destroyed or damaged buildings conducted by The New York Times in collaboration with remote sensing experts Corey Scher from the Graduate Center of the City University of New York and Jamey Van Den Hoek from Oregon State University [8]

Their study used radar satellite data capable of detecting even minor structural changes. Approximately 900 of the damaged or destroyed buildings are protected under the Geneva Conventions, including 106 hospitals, 109 churches, and 708 schools. Many cities and villages are literally wiped off the face of the Earth or at least severely damaged, and an actual destruction may be far more large-scale. In May 2024, Ukraine's Prime Minister Denys Shmyhal stated that Russia had destroyed or damaged 250,000 only residential buildings, about 4,000 schools, more than 1,000 hospitals, and numerous other civilian buildings. The total damage from the invasion was estimated at \$486 billion [9].

The investigation was conducted on the high-rise building at 6-A Lobanovskyi Avenue in Kyiv, which suffered significant damage from a missile strike on February 26, 2022 (Figure 6, Figure 7).

The study evaluated the technical condition of the building and its suitability for further use. The following activities were performed: a general inspection of the building and a detailed inspection of the damaged section (axes 1–5/G–K) to identify

structural damage; engineering and geodetic measurements of vertical and horizontal displacements of the building; instrumental testing of the actual concrete strength of the building's pylons; calculation of a spatial model of the building under static and dynamic loads; determining forces in the remaining elements considering the destruction of some load-bearing components; verification of the actual state of the pylons and their elements; calculation of the actual stress-strain state of the building (Table 1 from the dissertation by S. Kurash, conducted under the scientific supervision of Prof. Iu. Kaliukh [6]). The findings were compiled into a technical report on the building's condition.

These pylons must either be reinforced or replaced. Therefore, additional urgent anti-collapse measures were recommended, along with technical solutions for strengthening and partially re-placing damaged building structures. The reduction in the building's lifespan is depicted in Figure 8. Before the missile strike (Point A, identical to Point B), the building at 6-A had no damage, and its structural performance curve matched the load-bearing capacity curve of a similar building at 6-B Lobanovskyi Avenue (Figure 8).



Fig. 6. General view of the building at 6A Lobanovsky Avenue after the rocket impact on April 26, 2022

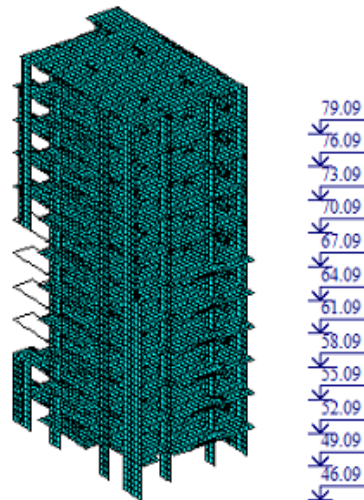


Fig. 7. Digital Shadow of the building at 6A Lobanovsky Avenue in Kyiv with damaged elements on floors 18-21

After sustaining damage, the dynamic characteristics of the building 6-A at Lobanovskyi Avenue, Kyiv, changed (frequencies, amplitudes, etc.), as shown at Point A'. The building becomes unsuitable for normal use (Zone c), demonstrates increased susceptibility to displacements. It can be noticed while comparing vibration displacement projections at identical points of buildings 6-A and 6-B. Under current conditions, the operational lifespan of 6-A decreases by approximately $\Delta T \approx 30$ years. To restore the building to a safe technical state, allow residents to return, and extend its operational lifespan beyond the current estimate (≈ 70 years), comprehensive restoration work is required.

experimental observations of the building's behavior. During the tilt correction process, the deformation and force characteristics gradually stabilized, and the stresses in the system reached safe values. Fig. 6 and Fig. 7 shows the changes in node displacements and the distribution of principal stresses in the building's structures during the straightening process. The conducted studies on the changes in the building's SSS allow us to conclude that during the straightening of the building by local reshaping of the soil base through drilling horizontal cylindrical boreholes, the stresses that arise in the load-bearing structural elements do not always decrease and, in some cases, may exceed the allowable values for the construction materials. This can be explained by: (1) the complex response of the spatial structural system of a multi-story building to external impacts; (2) the uneven distribution of stiffness in its elements; (3) the presence of defects; and (4) zones of critical stress. The developed methodology for adjusting the Model based on feedback from experimental MIMS data in real-time allows for control of the building's SSS parameters.



Fig. 9. General view of the deformation seam between block sections No. 3 and No. 1 before straightening (a); and after straightening (b) at 23, 25, Engineer Preobrazhenskyi St., Zaporizhzhya, Ukraine [10]

Conclusion

1. A comparative analysis was conducted to investigate the damage to buildings under two types of dynamic impacts: periodic industrial explosions at the "PivdGZK" iron ore quarry in Kryvyi Rih and a one-time missile strike on a high-rise building in Kyiv on April 26, 2022, based on fib Bulletin 59. The study has demonstrated how the life cycle curve of buildings is transformed under periodic dynamic impacts and one-time impacts from hostilities compared to the standard building lifecycle curve [4, 5].

2. The information-measurement system "Monitoring," which allows for real-time tracking of the stress-strain state parameters of the multi-story building, has been incorporated into the straightening control system. It enables the adjustment of tilt-elimination works based on current monitoring and calculations of the digital spatial model of the multi-story building and the stress-strain state of the "reshaped soil base – tilted strip foundation" system. Therefore, a methodology for using Digital Twin as an element of the system controlling the tilt elimination process has been developed.

3. The methodology was implemented during the straightening of an actual multi-story building in the city of Zaporizhzhia, Ukraine. Mechanical drilling of horizontal cylindrical boreholes was selected as the most rational method for reshaping the base soil and eliminating the building's tilt. The weakening of the base soil was achieved by drilling two rows of horizontal cylindrical boreholes up to 15 meters long with variable diameters of 0.16...0.22 m. Moistening the borehole walls accelerated the process of technological settlements to the required value. The work to form the building's counter-tilt lasted 14 days. Uneven settlements of the building in the longitudinal direction were achieved at 0.041...0.055 m, and in the transverse direction – at 0.092...0.178 m [10, 11].

REFERENCES

1. fib. (n.d.). *fib Bulletin 59: Condition control and assessment of reinforced concrete structures*. Retrieved from <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/condition-control-and-assessment-of-reinforced-concrete-struct-detail.html>
2. Todisco, L. (2014). *An integrated approach to conceptual design of arch bridges with curved deck* (Master's thesis, Engineering of Structures, Materials and Foundations). Advisor: Hugo Corres Peiretti. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/307578025_An_integrated_approach_to_conceptual_design_of_arch_bridges_with_curved_deck
3. Kaliukh, I., Dunin, V., Marienkov, M., et al. (2023). Peculiarities of applying the risk theory and numerical modeling to determine the resource of buildings in a zone of influence of military actions. *Cybernetics and Systems Analysis*, 59, 612–623. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00596-w>
4. Dunin, V. A. (2021). *Influence of industrial explosions on durability of constructions of buildings in the conditions of Kryvyi Rih* (Candidate's thesis, Technical Sciences). Supervisor Prof. Kaliukh I. The State Enterprise "Research Institute of Building Constructions," Kyiv.
5. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., Dunin, V., & Kyrash, S. (2022). Dynamic certification and assessment of the building's life cycle under regular explosive impacts. *System Research and Information Technologies*, 4, 100–118. <http://journal.iasa.kpi.ua/article/view/255010>
6. Kurash, S. (2023). *Mathematical modeling of the reaction of buildings and structures to explosive effects* (Candidate's thesis, Technical Sciences). Supervisor Prof. Kaliukh I. ITGIP NASU, Kyiv.

7. Gorodetsky, A. S. (Ed.). (2017). *LIRA-CAD (2017) software package: User guide. Teaching examples*. Retrieved from <https://www.liraland.ua/news/update/5454/>
8. Scientists have calculated how many buildings in Ukraine were destroyed by the Russian army: the quantity is shocking. (n.d.). Retrieved from https://www.dialog.ua/ukraine/296077_1717492762
9. Shmyhal said how many destroyed infrastructure facilities have already been restored. (n.d.). Retrieved from <https://delo.ua/ru/realty/smigal-rasskazal-skolko-razrusennykh-obektov-infrastruktury-uze-udalos-vosstanovit-429471/>
10. Shokarev, A. V. (2024). *Information and hardware provision for rectifying tilts of multi-story buildings* (Candidate's thesis, Technical Sciences). Supervisor Prof. Kaliukh I. ITGIP NASU, Kyiv.
11. Marienkov, M., Kaliukh, I., & Trofymchuk, O. (2024). The digital twin use for modeling the multi-storey building response to seismic impacts. *Structural Concrete*, 25(3), 2079–2096. <https://doi.org/10.1002/suco.202300695>

The article was received 15.05.2025 and was accepted after revision 27.08.2025

Ю.І. Калюх, А.В. Шокарев, С.Ю. Кураш
ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ CONSTRUCTION 4.0 ДЛЯ
ПОНІВЧЕНИХ БУДІВЕЛЬ

Анотація. Метою роботи було проведення порівняльного аналізу пошкоджень, завданих висотній будівлі (ВБ) динамічними впливами двох типів: періодичними промисловими вибухами на залізорудному кар'єрі гірничо-збагачувального комбінату «УГЗК» у Кривому Розі та ракетним ударом по ВБ у Києві 26 лютого 2022 року. За основу було використано бюлетень fib 59. Дослідження демонструє, як трансформується крива життєвого циклу ВБ під впливом періодичних динамічних впливів та одноразового впливу бойових дій порівняно зі стандартною кривою бюлетеня fib 59. Застосовані методи включали візуальний та інструментальний огляд будівель з використанням методів неруйнівного контролю, геодезичних та вібраційних приладів з Інтернетом речей для уточнення початково-граничних умов під час створення ВБ Construction 4.0 (Цифрових двійників). Тому було проведено його експериментальну перевірку. Для розрахунків було використано розрахунковий пакет LIRA-CAD.

Розроблено методологію використання Construction 4.0 (Цифрових двійників) як елемента системи керування випрямленням. Це дозволяє коригувати роботи з усунення нахилів на основі поточного моніторингу та розрахунку цифрової просторової моделі багатоповерхової будівлі та напружено-деформованого стану системи "переформована ґрунтова основа – похилий стрічковий фундамент". Також продемонстровано успішне впровадження методології. Багатоповерхову будівлю в Запоріжжі (Україна) було випрямлено без переселення мешканців або відключення важливих комунікацій (ліфти, водопостачання тощо). Розглянуто три етапи формування Цифрового двійника (Будівництво 4.0) для зазначених об'єктів: формування Цифрової Моделі; формування Цифрових двійників, коли задіяні методи та засоби неруйнівного контролю, та останній етап – Цифровий двійник, коли результати та рекомендації результатів перших двох етапів враховуються під час реконструкції або відновлення оригінального фізичного об'єкта для Цифрового двійника.

Ключові слова: Будівництво 4.0, Цифровий двійник, висотна будівля, напружено-деформований стан, прогнозування, Інтернет речей.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2025 і прийнята до друку після рецензування 27.08.2025

Калюх Юрій Іванович

доктор технічних наук, головний науковий співробітник відділу природничих ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7240-4934> **e-mail:** kalyukh2002@gmail.com

Шокарев Андрій Вікторович

кандидат технічних наук, завідувач лабораторії Державного підприємства «Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Преображенська 5/2

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1713-530X> **e-mail:** unaryand@gmail.com

Кураш Сергій Юрійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Державного підприємства «Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Преображенська 5/2

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-5810-9258> **e-mail:** zuvs2004@gmail.com

УДК 532.465, 519.63, 004.272.2

Maksym Sorokin¹, Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3165-6040> **e-mail:** maxim.sorockin@gmail.com

Mark Zheleznyak², Ph.D. (Physics and Mathematics), Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7723-6052> **e-mail:** zheleznyak.m@gmail.com

Sergii Kivva¹, Ph.D. (Physics and Mathematics), Head Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8570-6579> **e-mail:** skivva@gmail.com

Oleksandr Pylypenko¹, Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6883-5018> **e-mail:** oi.pylypenko@gmail.com

¹Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute of Environmental Radioactivity at Fukushima University, Japan

PARALLEL MODELING OF SEDIMENT AND RADIONUCLIDE TRANSPORT IN RIVERS ON MULTIPROCESSOR SYSTEMS AND GRAPHICS PROCESSORS

Abstract. The study aims to develop and implement parallel algorithms for modeling sediment and pollutant transport in rivers within the COASTOX-UN modeling system, utilizing multiprocessor systems and graphics processing units (GPUs). The modeling system includes a hydrodynamic module (COASTOX-HD), a sediment transport module (COASTOX-SED), and a radionuclide transport module (COASTOX-RN), which can also be adapted for other pollutants. The methodology is based on numerical solutions of two-dimensional shallow water equations and advection-diffusion transport equations using the finite volume method on unstructured grids. Parallel computing is implemented through MPI (for distributed-memory systems) and OpenACC (for GPUs). The system was tested for simulating radionuclide transport in the Kyiv Reservoir during the 1999 spring flood and assessing organic pollutant concentrations in the Dnipro River near Kyiv following transboundary contamination of the Desna River in autumn 2024. Results demonstrate high computational efficiency of the developed algorithms. The combination of MPI and OpenACC technologies in the parallelized COASTOX-UN model enables simulations of sediment and pollutant transport on detailed grids for large water bodies, running efficiently on workstations, servers, and even gaming PCs/laptops with powerful GPUs. GPU-based computations outperform professional workstations in efficiency. The study highlights COASTOX-UN's potential for operational pollution forecasting during emergencies. The key innovation lies in adapting parallel computing algorithms for both CPUs and GPUs, significantly reducing computational costs without compromising accuracy. Future research will expand COASTOX-UN's functionality for additional pollutant types and further assess risks of anthropogenic impacts on aquatic ecosystems.

Keywords: river contamination modeling, shallow water equations, finite volume method, parallel computing, GPU computing, MPI, OpenACC.

М.В. Сорокін¹, М.Й. Железняк², С.Л. Ківва¹, О.І. Пилипенко¹

¹Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

²Інститут радіоактивності навколишнього середовища, Університет Фукусіма, Японія

ПАРАЛЕЛЬНЕ ДВОВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТУ НАНОСІВ І ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В РІЧКАХ НА БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ І ГРАФІЧНИХ ПРОЦЕСОРАХ

Анотація. Метою дослідження є розробка та впровадження в інформаційно-моделюючу систему COASTOX-UN паралельних алгоритмів для моделювання транспорту наносів і забруднюючих речовин у річках з використанням багатопроцесорних систем і графічних процесорів (GPU). Система моделювання включає гідродинамічний модуль (COASTOX-HD), модуль транспорту наносів (COASTOX-SED) та модуль переносу радіонуклідів (COASTOX-RN), що може адаптуватися для розрахунків також інших забруднюючих речовин. Методологія дослідження базується на чисельному розв'язанні двовимірних рівнянь мілкої води і адвективно-дифузійних рівнянь переносу методом скінченних об'ємів на неструктурованих сітках. Для паралелізації обчислень використовуються технології MPI (для систем з розподіленою пам'яттю) та OpenACC (для GPU). Представлено приклади тестування системи для розрахунків розповсюдження радіонуклідів у Київському водосховищі під час весняного водопілля 1999 року, а також для оцінки концентрацій органічного забруднення на р. Дніпро біля м. Києва під час транскордонного забруднення р. Десна восени 2024 року. Результати дослідження демонструють високу обчислювальну ефективність розроблених алгоритмів. Показано, що поєднання технологій MPI та OpenACC у паралельній версії моделі COASTOX-UN дозволяє моделювати транспорт наносів та забруднюючих речовин на деталізованих сітках для великих водних об'єктів і на робочих станціях, серверах і на «ігрових» ПК/ноутбуках з потужними GPU. Обчислювальна ефективність технології на графічних процесорах перевищує показники професійних робочих станцій. Продемонстровано можливість використання моделі COASTOX-UN для оперативного прогнозування забруднення водойм, зокрема під час надзвичайних ситуацій. Оригінальність дослідження в поєднанні технологій адаптації алгоритмів паралельних обчислень для CPU і GPU, що надає користувачам можливість зниження витрат часу на обчислювальні ресурси без втрати точності. Подальші дослідження будуть спрямовані на розширення функціоналу COASTOX-UN для інших типів забруднювачів і подальші оцінки ризиків антропогенних впливів на водні екосистеми.

Ключові слова: моделювання річкових систем, рівняння мілкої води, метод скінченних об'ємів, паралельні обчислення, обчислення на GPU, MPI, OpenACC.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.61-75>

Вступ

Наша публікація є продовженням статті [1], в якій представлені паралельні алгоритми гідродинамічного модуля системи моделей COASTOX-UN, що базується на чисельному розв'язанні двовимірних рівнянь мілкої води (PMB) методом скінченних об'ємів. Модель COASTOX почала розроблятися після аварії на Чорнобильській АЕС для прогнозування транспорту радіонуклідів у розчині на завислих наносах у водоймах басейну р. Дніпро [2]. На основі цього досвіду наступні версії моделі були включені в Модуль Гідрологічної Дисперсії радіонуклідів системи підтримки прийняття рішень

RODOS/JRODOS, яка розробляється з початку 90-х років в проєктах рамкових науково-дослідних програм ЄС [3]. Модель COASTOX також успішно використовувалась для розрахунку розповсюдження цезію-137 в японських водосховищах, забруднених після аварії на АЕС Фукусіма Дайїчі [4], а також для оцінки впливів військових дій на стан дніпровських водосховищ [5].

Новим етапом розвитку стало впровадження в COASTOX паралельних алгоритмів, які дозволили значно прискорити розрахунки на відносно недорогих комп'ютерах, але з потужними графічними процесорами (GPU). Огляд сучасних інформаційних технологій паралельних обчислень стану водних систем на GPU представлено, наприклад, в [1, 6]. Алгоритми розпаралелювання чисельних схем розв'язку рівнянь гідродинамічного модуля COASTOX-HD системи COASTOX-UN використовують програмне середовище MPI+OpenACC для багатопроцесорних робочих станцій і серверів, а також GPU [1]. Для задач транспорту наносів і радіонуклідів, чи інших забруднень в COASTOX використовується чисельне розв'язання двовимірних рівнянь адвективно-дифузійного переносу з додатковими членами типу «джерело-стік» для опису міжфазних обмінів. Радіонукліди у воді існують у розчиненій формі та адсорбованими на наносах. Огляд сучасних методів параметризації обмінів між радіонуклідами в розчині, на наносах і в дні представлений в [4].

В даній статті викладаються методи розпаралелювання моделі транспорту наносів і переформування берегів – COASTOX-SED і моделі переносу радіонуклідів і радіоактивного забруднення дна – COASTOX-RN, яка з відповідними параметрами може використовуватися і для інших хімічних забруднень. Модель тестується на прикладі задачі розрахунку розповсюдження стронцію-90 в Київському водосховищі, під час весняної повені 1999 року. Наведені результати моделювання оцінки впливу скидів з Київської ГЕС на можливість розбавлення органічного забруднення, яке поступало з р. Десна в р. Дніпро біля м. Києва.

Основні рівняння моделей

Нелінійні двовимірні рівняння мілкої води (ПМВ) і використані в COASTOX-HD алгоритми їх чисельного паралельного розв'язання представлено в [1]. Течії призводять до розмиву донних відкладів, перенесення наносів потоком і перевідкладення з переформуванням донного рельєфу. Ці процеси в COASTOX-UN описуються на основі збереження маси донних відкладів за допомогою двовимірного адвективно-дифузійного рівняння переносу частинок потоком рідини:

$$\frac{\partial(hS)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(q_i S) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(h D_{ij} \frac{\partial S}{\partial x_j} \right) + (Q_e - Q_d), \quad (1)$$

разом з рівнянням ерозії/осадження (аналог рівняння Екснера):

$$(1 - \phi) \rho_b \frac{\partial \eta}{\partial t} = -(Q_e - Q_d), \quad (2)$$

де S – осереднена по глибині концентрація наносів у воді (кг/м³); D_{ij} – компоненти коефіцієнта горизонтальної дифузії; ρ_b – густина донних відкладень; ϕ – пористість верхнього донного шару; Q_e і Q_d – швидкості ерозії і осадження (маса наносів з одиниці площі в одиницю часу); h – глибина води,

яка визначається відмітками дна η і вільної поверхні води ξ відносно незбуреного рівня води ($h = \xi - \eta$); u , v означимо x та y компоненти осередненої по глибині швидкості потоку; $q_x = uh$, $q_y = vh$.

Q_e і Q_d в формулах (1), (2) мають сенс повних швидкостей ерозії і осадження, що виражаються через рівноважну осереднену по глибині концентрацію наносів S^* і фактичну концентрацію S [2]:

$$Q_e - Q_d = \beta w_0 (S^* - S), \quad (3)$$

де w_0 – швидкість осадження частинок (гідравлічна крупність); β – коефіцієнт розмиву, який є калібрувальним параметром, так як включає і відношення придонної концентрації наносів до осередненої по глибині концентрації і екрануючі властивості розмиву поверхні дна річкових потоків.

В COASTOX-UN рівноважна концентрація виражається через повну транспортувальну ємність потоку наносів (завислих та донних разом) і може розраховуватись за декількома відомими формулами: Van Rijn, Soulsby, Camenen & Larsen [7].

На перенос радіонуклідів у водному середовищі впливає багато факторів, таких як адвекція-дифузія розчинених радіонуклідів, адвекція-дифузія радіонуклідів, що адсорбовані завислими частинками, осадження та підйом з дна забруднених частинок, дифузія між поровою водою верхнього донного шару та водною товщею, сорбція-десорбція радіонуклідів між водою та завислими частками та між водою та донними відкладами, поглинання радіонуклідів живими організмами [4].

В моделі COASTOX-UN транспорт радіонуклідів у розчинній формі розраховується двовимірним адвективно-дифузійним рівнянням:

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (q_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(h D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \lambda h C - a_s h S (k_a^s \rho_b^{-1} C - C_s) - (1 - \phi) Z_* a_b (k_a^b C - C_b), \quad (4)$$

де C – об’ємна осереднена по глибині концентрація радіонуклідів у розчинній формі (Бк/м³); C_s – концентрація радіонуклідів на завислих наносах (Бк/кг); C_b – об’ємна концентрація радіонуклідів у верхньому донному шарі (Бк/м³); Z_* – товщина верхнього активного донного шару; λ – константа радіоактивного напіврозпаду; k_a^s і k_a^b – безрозмірні коефіцієнти розподілу в системі «вода – завислі частинки» і «вода – верхній донний шар»; a_s і a_b – відповідно швидкості обміну для цих систем.

Великий обсяг експериментальних даних, накопичених за останні роки після аварії на Чорнобильській АЕС, свідчить про те, що характерні часи десорбції довші за характерні часи адсорбції. Щоб врахувати цю різницю в характерних часах, швидкості обміну у рівнянні (4) та далі формулюються у вигляді [8]:

$$a_s = \begin{cases} a_{12}, k_a^s \rho_b^{-1} C > C_s \\ a_{21}, k_a^s \rho_b^{-1} C < C_s \end{cases}, a_b = \begin{cases} a_{13}, k_a^b C > C_b \\ a_{31}, k_a^b C < C_b \end{cases}, \quad (5)$$

де a_{12} , a_{13} – коефіцієнти швидкості адсорбції відповідно для систем «вода – завислі частинки» та «вода – верхній донний шар»; a_{21} , a_{31} – коефіцієнти швидкості десорбції для тих самих систем.

До адвективно-дифузійного рівняння транспорту радіонуклідів на завислих частинках додається член типу джерело-стік, що описує процеси обміну з дном за рахунок розмиву дна і осадження забруднених частинок:

$$\frac{\partial(hSC_s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(q_i SC_s) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(hD_{ij}\frac{\partial SC_s}{\partial x_j}\right) - \lambda h SC_s + a_s h S(k_d^s \rho_b^{-1} C - C_s) + Q_e \rho_b^{-1} C_b - Q_d C_s. \quad (6)$$

Забруднення верхнього донного шару описується рівнянням:

$$(1 - \phi) \frac{\partial}{\partial t}(Z_* C_b) = -\lambda(1 - \phi) Z_* C_b + (1 - \phi) a_b Z_* (k_d^b C - C_b) - (Q_e \rho_b^{-1} C_b - Q_d C_s). \quad (7)$$

Розроблені чисельні алгоритми розв'язання рівнянь моделі

Для чисельного розв'язання рівнянь в часткових похідних моделі COASTOX-UN використовується метод скінченних об'ємів. Для гідродинамічного модуля чисельну схему його реалізації для PMB – TVD-схему Годуновського типу для неструктурованих сіток – представлено в [1].

Моделі системи COASTOX-UN використовують єдину розрахункову сітку – неструктуровану сітку з трикутними комірками [1]. Гідродинамічні змінні, концентрації наносів і радіонуклідів визначаються у центрах комірок, рівень дна задається у вузлах сітки, потоки через границі між комірками – у серединях сторін трикутників.

В даній роботі чисельну схему для PMB адаптовано для розв'язку транспортних рівнянь (1), (4), (6). Після інтегрування рівнянь переносу (1), (4), (6) по трикутних комірках розрахункової сітки утворюється система алгебраїчних рівнянь, у яких наближені значення часових похідних від концентрацій виражаються через суми потоків через сторони та осереднене по комірці значення вектора вільних членів:

$$\Delta A \frac{\Delta h X}{\Delta t} = -\sum_{k=1}^3 X \cdot \mathbf{n}_k \Delta l_k + \sum_{k=1}^3 \mathbf{F}_k^d \cdot \mathbf{n}_k \Delta l_k + \Delta AR, \quad (8)$$

де Δt – часовий крок, ΔA – площа контрольного об'єму, $\mathbf{n}_k$ – одинична нормаль до сторони k ($\mathbf{n} = (n_x, n_y)$), Δl_k – довжина сторони k . Тут X – одна з концентрацій: S, C, SC_s ; R – вільний член, що відповідає рівнянням (1), (4), (6).

Для обчислення дифузійних потоків через границі контрольного об'єму в (8) використовується центральна різницева апроксимація. Для адвекції застосовано варіант схеми SEA (Simple Efficient Algorithm) для неструктурованих сіток, яка використовується в [1] для PMB. Її адаптовано до транспортних рівнянь. Згідно з цією схемою, на етапі предиктора використовується upwind-апроксимація адвективного потоку, а на етапі коректора – downwind-апроксимація. Комбінація потоків низького та високого порядків здійснюється з використанням TVD-обмежувача: minmod, superbee, van Leer, MC.

Отримана в результаті чисельна схема для адвекції-дифузії у рівняннях переносу є монотонною, що підтримує початковий розподіл концентрації домішки при розповсюдженні її у воді за відсутності дифузії.

Врахування членів типу джерело-стік у рівняннях транспорту наносів відбувається одночасно з розв'язанням рівняння динаміки дна, а в рівняннях переносу радіонуклідів – одночасно з рівнянням забруднення верхнього шару дна. Рівняння змін відміток дна (2) і рівняння забруднення верхнього шару дна (7) не містять просторових похідних, часові похідні в них апроксимуються із першим порядком точності, праві частини цих рівнянь і члени джерело-стік у рівняннях переносу трактуються неявно.

Рівняння забруднення верхнього шару дна разом із рівнянням переносу розчинених радіонуклідів та рівнянням переносу радіонуклідів на завислих частинках утворюють зв'язану систему трьох рівнянь. Для її розв'язання використовується метод Крамера, незалежно для кожної комірки розрахункової сітки.

Чисельні схеми рівнянь динаміки наносів і радіонуклідів сформульовані на мові програмування FORTRAN, так само, як і решта коду системи COASTOX-UN.

Впроваджені технології паралельних обчислень

Для паралельного розв'язку рівнянь моделей COASTOX-SED і COASTOX-RN використовується підхід, розроблений у [1] для PMB. Рівняння моделей -SED і -RN представляють собою рівняння типу адвекції-дифузії і кінетичні рівняння, які є звичайними диференційними рівняннями відносно часу. Чисельні схеми розв'язку цих рівнянь реалізовано в програмному коді у вигляді циклів по елементах розрахункової сітки. Представлений у [1] алгоритм використовує незалежність ітерацій цих циклів по елементах сітки при обчисленні гідродинамічних змінних і потоків, а також локальність шаблонів чисельних схем. Він є гібридним і поєднує технології MPI та OpenACC, що дозволяє застосовувати його як на комп'ютерах з розподіленою пам'яттю (наприклад, кластерах), так і на комп'ютерах із загальною пам'яттю – багатоядерних робочих станціях та графічних процесорах.

Для систем із розподіленою пам'яттю розпаралелення будується на розділенні розрахункової області на підобласті за допомогою бібліотеки розбиття графів METIS. Кожен процесор або обчислювальний вузол паралельної системи виконує обчислення у межах своєї підобласті, а обмін даними між ними реалізовано на основі бібліотеки MPI.

Шаблони чисельних схем для моделей -SED і -RN не створюють нових інформаційних залежностей порівняно зі схемами для PMB. Тому структури halo-елементів, типи даних MPI та функції обміну, розроблені для PMB [1], використовуються і для нових моделей. Таким чином, розпаралелювання моделей -SED і -RN зводиться до додавання функцій обміну даними у відповідних halo-елементах після оновлення значень змінних у вузлах, комірках або на сторонах комірок.

Так, наприклад, при розв'язанні трьох рівнянь переносу (наносів, розчинених радіонуклідів, радіонуклідів на частинках) за адаптованою схемою SEA обміни даними додаються у такому порядку:

- Етап предиктора:
 - Розраховуються граничні потоки наносів/радіонуклідів.
 - Розраховуються дифузійні потоки.
 - Розраховуються адвективні потоки (upwind).

- Виконується корекція потоків, щоб не було перевитрати маси.
- Розраховується зміна концентрації за рахунок адвекції і дифузії.
- **Оновлюються концентрації в halo-комірках.**
- Етап коректора:
 - Розраховуються граничні потоки наносів/радіонуклідів.
 - Розраховуються адвективні потоки (downwind).
 - **Оновлюються адвективні потоки у halo-ребрах.**
 - Виконується TVD корекція потоків.
 - Виконується корекція потоків, щоб не було перевитрати маси.
 - Розраховується зміна концентрації за рахунок адвекції.
 - **Оновлюються концентрації в halo-комірках.**

Паралелізація алгоритмів COASTOX-UN для багатоядерних комп'ютерів і GPU також використовує незалежність ітерацій поелементних циклів. Для цього в [1] було запроваджено багатопотоковий підхід на основі OpenACC. Директиви OpenACC вказують компілятору, що підтримує цю технологію, які ділянки коду (зокрема ітерації циклів) слід розподіляти між потоками, що обчислюються паралельно ядрами процесора.

Принцип розпаралелювання рівнянь переносу і кінетики залишається тим самим, як і для РМВ. Поелементні цикли чисельних схем цих рівнянь оформлюються директивами OpenACC відповідно до стилю, описаного в [1]:

!\$ACC DATA PRESENT(імена глобальних масивів)

!\$ACC KERNELS

!\$ACC LOOP INDEPENDENT PRIVATE(імена локальних змінних)

Тіло циклу

!\$ACC END KERNELS

!\$ACC END DATA

Перед стартом ітераційного процесу за часом масиви змінних, що використовуються у цих рівняннях, додатково копіюються на GPU за допомогою директив **!\$ACC DATA COPY(...)** або **COPYIN(...)**. Перед виводом змінних у зовнішні файли ці масиви змінних, разом з гідродинамічними змінними, копіюються з GPU до центрального процесора за допомогою директив **!\$ ACC UPDATE HOST(...)**.

Результати тестування обчислювальної ефективності паралелізації модуля транспорту радіонуклідів та інших забруднювальних речовин

Тестування проводилось на наступному обладнанні:

- Двохпроцесорна робоча станція Dell Precision Workstation 7920 з 20-ядерними процесорами Intel Xeon Gold 6230, із тактовою частотою 2.1 ГГц і оперативною пам'яттю 96 ГБ (ціна близько \$15 000 доларів). Операційна система станції – Windows 10 Pro for Workstations. Для компіляції та збірки виконуваного файлу COASTOX-HD використовувався компілятор Intel Fortran Compiler 19.0.4.245 разом із бібліотекою Intel MPI Library 4.0.

- Графічна карта NVIDIA GeForce RTX 3080, архітектури Ampere, із 8704 ядрами частотою 1.71 GHz та 10 GB оперативної пам'яті. Пікова продуктивність – 29.77 TFLOPS на одинарній точності і 465.1 GFLOPS на подвійній точності, пропускна здатність пам'яті – 760.3 GB/s. Карта встановлена на ПК із операційною системою Linux Ubuntu 20.04 LTS. Для збірки виконуваного файлу для GPU під Linux використовувався компілятор, що підтримує технологію OpenACC – NVIDIA Fortran 22.1-0.

Валідація моделі на прикладі розповсюдження стронцію-90 у Київському водосховищі під час весняного водопілля 1999 р.

Для тестування паралельного модуля переносу радіонуклідів COASTOX-UN були використані дані вимірів динаміки ^{90}Sr у р. Прип'ять біля м. Чорнобиль, в р. Дніпро біля впадіння в Київське водосховище та у Київському водосховищі біля греблі Київської ГЕС [9-11]. Карта забруднення дна ^{90}Sr для моделювання перераховувалась з карти забруднення дна ^{137}Cs , розробленої Українським гідрометеорологічним інститутом ДСНС і НАНУ та опублікованої на рис. 4.32 у [9]. Моделювання 91 дня динаміки радіонуклідів, починаючи з 01.03.1999 р., проводилось при заданому наборі параметрів для ^{90}Sr , рекомендованих у Звіті проєкту RODOS [8].

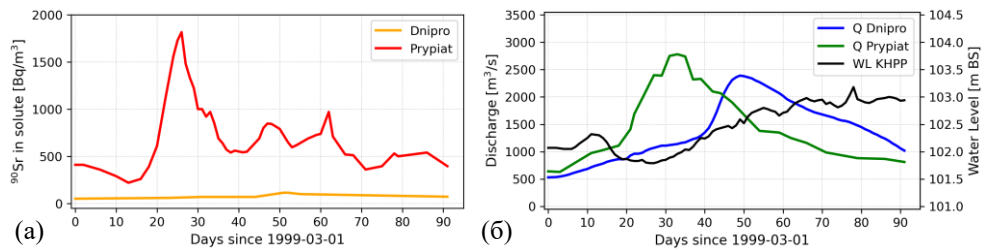


Рис. 1. Концентрація ^{90}Sr у р. Прип'ять та р. Дніпро біля впадіння в Київське водосховище (а), а також витрати води в річках і рівень води на Київській ГЕС (б) з 01.03.1999 р., які використовувались як граничні умови моделі COASTOX-UN

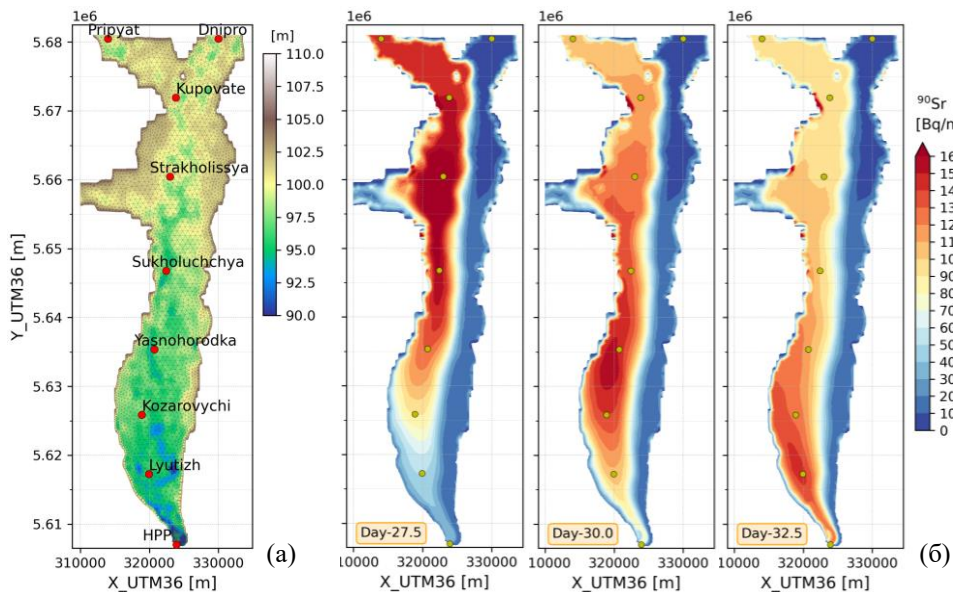


Рис. 2. Карта відміток дна в Київському водосховищі на розрахунковій сітці моделі (а) і розподіл обчислених концентрацій ^{90}Sr на 27.5, 30 і 32.5 день від 1.03.1999 р. (б).

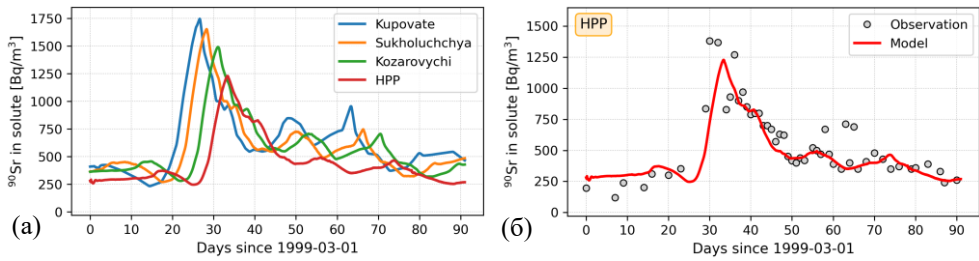


Рис. 3. (а) Розрахована часова динаміка концентрації ^{90}Sr вздовж старого фарватеру Дніпра (Рис. 2 а). (б) Динаміка концентрації біля греблі ГЕС в порівнянні з даними вимірів, представленими в [10]

Порівняння результатів моделювання розповсюдження ^{90}Sr в Київському водосховищі з даними вимірів (Рис. 3) демонструє, що розрахована динаміка часових змін концентрацій ^{90}Sr і максимальні значення концентрацій є близькими до експериментальних даних.

У Табл. 1 наведено час моделювання 1 дня для обраного 91-денного сценарію на графічній карті NVIDIA RTX 3080 та 2-процесорній 40-ядерній робочій станції Dell 7920 у непаралельному та паралельному (MPI) режимах. Для MPI-реалізації вказано мінімальний час, досягнутий при оптимальній кількості процесів.

Таблиця 1. Параметри ефективності моделі паралельних обчислень для сценарію «Київське водосховище, водопілля 1999 р.»

Число комірок	Час розрахунку, хв				Прискорення			Відносно MPI	
	Dell 7920		RTX 3080		Dell MPI	RTX 3080		RTX 3080	
	Serial	MPI	DP	SP		DP	SP	DP	SP
7 594	3.4	0.66	1.36	1.29	5.19	2.50	2.63	0.48	0.51
30 376	27.4	2.88	3.07	2.69	9.51	8.95	10.20	0.94	1.07
486 016	2447	131.7	40.3	24.9	18.58	60.78	98.45	3.27	5.30
1 944 064	21245	1268	237.1	136.3	16.76	89.60	155.85	5.35	9.30
7 776 256	162172	9786	1657	1216	16.57	97.85	133.38	5.90	8.05

Розрахунки на GPU виконувалися як у подвійній (DP), так і в одинарній (SP) точності, що пов'язано з вищою заявленою продуктивністю відеокарт для SP. Для аналізу залежності ефективності паралельних обчислень від розміру розрахункової сітки було використано базову сітку з 7 594 комірки та чотири додаткові сітки, отримані шляхом послідовного поділу кожної трикутної комірки на чотири (збільшення деталізації). Важливо зауважити, що зростання часу моделювання при збільшенні розмірів сітки обумовлено не лише збільшенням кількості комірок, а й необхідністю зменшення часового кроку відповідно до умови Куранта.

MPI-реалізація демонструє ефект насичення: для сіток з понад 100 тис. комірок прискорення досягає 17–18 разів порівняно з непаралельною версією. Однак для сіток із кількома мільйонами комірок використання MPI стає неефективним через надмірний час обчислень (перевищення реального часу моделювання).

GPU-версія також має ефект насичення. Для малих сіток (до 100 тис. комірок) вона поступається MPI, але для більших сіток переважає за продуктивністю. Наприклад, для сітки з понад 1 млн комірок: у подвійній точності GPU у 5 разів швидший за MPI, в одинарній точності – у 8–9 разів. Навіть для сітки розміром ~2 млн комірок GPU забезпечує моделювання швидше за реальний час.

Згідно з нашим досвідом використання моделі COASTOX-UN для задач гідравліки та перенесення забруднень, відмінності між результатами в подвійній та одинарній точностях є меншими за похибки експериментальних вимірів. Це дозволяє рекомендувати одинарну точність для подібних розрахунків без втрати достовірності результатів.

Застосування моделі для оцінки сценаріїв розповсюдження органічного забруднення р. Дніпро у вересні-жовтні 2024 року

В середині серпня 2024 року на прикордонних ділянках р. Сейм були виявлені високі рівні забруднення органічними речовинами, що надходили з транскордонним водним потоком із території РФ. Виникла загроза перенесення забруднення Десною до водозабору м. Київ та потрапляння у р. Дніпро в межах м. Києва. Для прогнозу забруднення вод Дніпра біля Києва двовимірну гідравлічну модель COASTOX-HD, що раніше використовувалась для прогнозування зон затоплень під час високих повеней [1], було доповнено модулем прогнозу динаміки забруднень COASTOX-RN.

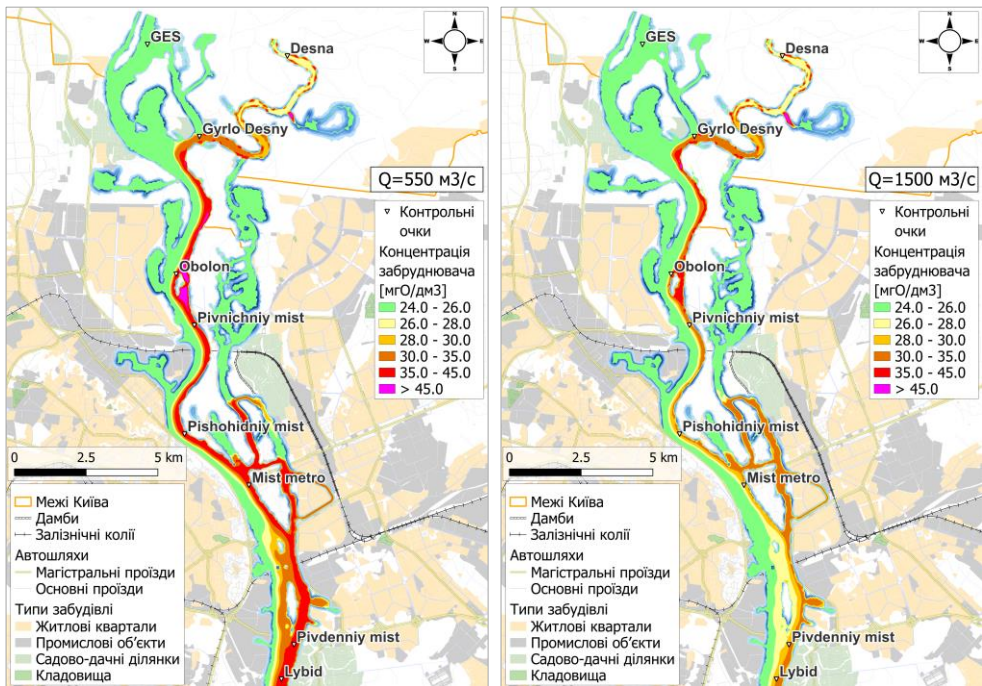


Рис. 4. Розподіл концентрації забруднювача для різних величин скидів КиївГЕС. Район Дніпра від греблі ГЕС до гирла р. Либідь. 6-й день від початку моделювання

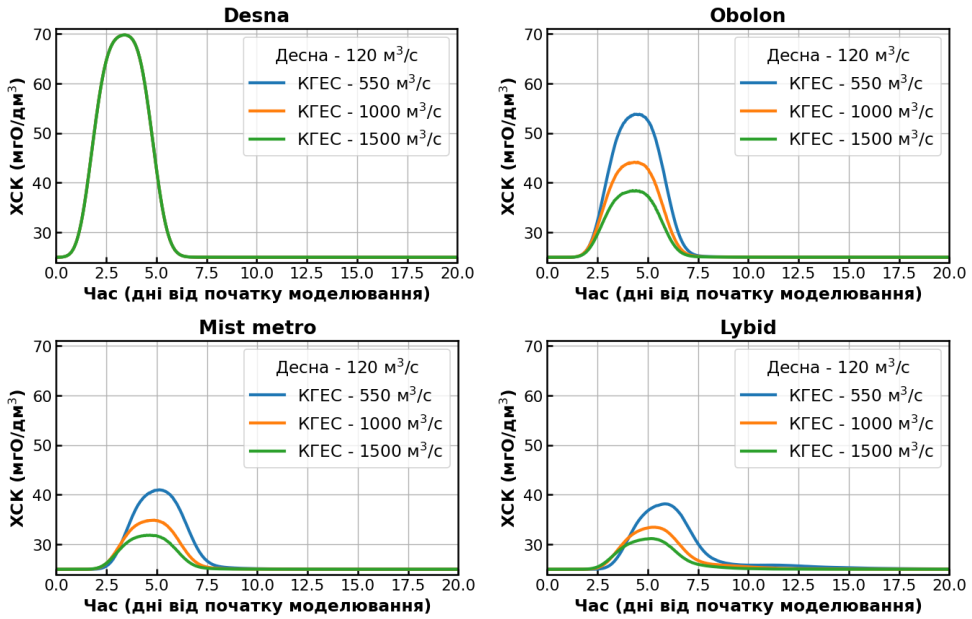


Рис. 5. Часова зміна концентрації забруднювача для різних величин скидів КиївГЕС в контрольних точках «Десна», «Оболонь», «міст Метро», «Либідь»

Вхідними перерізами для області моделювання були гребля Київської ГЕС та гирло р. Десна (Рис. 4), в перерізі якого задавалися сценарні концентрації забруднення. За прогностичними «оцінками зверху» пік концентрації ХСК у воді, що досягла гирла Десни, склав 70 мгО/дм^3 , а тривалість перевищення фонові концентрації становила приблизно 5 днів.

Для гідрологічної ситуації, актуальної на вересень, рівень Канівського водосховища становив 91.21 м БС, витрата Десни – $120 \text{ м}^3/\text{с}$, а середній скид води з Київської ГЕС – $550 \text{ м}^3/\text{с}$. Додатково розглядалися сценарії підвищених попусків із Київської ГЕС ($1000 \text{ м}^3/\text{с}$ та $1500 \text{ м}^3/\text{с}$) як можливий захід для зниження концентрації забруднювальних речовин у Дніпрі. Фонова концентрація ХСК у Дніпрі була задана сталою – 25 мгО/дм^3 .

Порівняння розподілів концентрації ХСК у Дніпрі для базового сценарію і для сценарію зі скидом Київської ГЕС $1500 \text{ м}^3/\text{с}$ показано на Рис. 4 разом з розташуванням контрольних точок моделі. Часову динаміку показника ХСК для обраних контрольних точок показано на Рис. 5, з якої видно перенесення забруднення та зниження пікової концентрації за течією Дніпра.

Часи добігу забруднення до контрольних точок у руслі Дніпра оцінені за різницею між часами піків концентрації в точках і у вхідному створі моделі. Вони наведені в Табл. 2. В таблиці також показані значення пікових концентрацій ХСК. Моделювання підтверджує, що підвищений попуск води з Київської ГЕС може бути засобом зниження концентрації забруднювальної речовини, що потрапляє в Дніпро з Десни, завдяки розбавленню більшими об'ємами води.

Таблиця 2. Максимальні концентрації ХСК та часи добігу плями забруднення від вхідного створу до контрольних точок моделі для сценаріїв різних скидів води з Київської ГЕС

Контрольна точка	Час добігу, год.			ХСК, мгО/дм ³		
КГЕС Q, м ³ /с	550	1000	1500	550	1000	1500
Десна	0	0.0	0.0	69.7	69.7	69.7
Гирло Десни	14	13.0	15.0	66.7	65.3	61.5
Оболонь	28	26.0	24.0	53.8	44.2	38.4
Північний міст	33	27.0	23.0	48.0	40.1	35.8
Пішохідний міст	39	33.0	31.0	44.1	37.1	33.5
Міст Метро	41	35.0	30.0	41.0	34.9	31.9
Південний міст	55	41.0	41.0	38.2	33.5	31.2
Либідь	59	46.0	42.0	38.2	33.5	31.2

В розглянутому сценарії біля Північного мосту пікову концентрацію за результатами розрахунків можна було знизити на 34% за рахунок заданого попуску води з ГЕС. При зростанні витрат води через ГЕС з 550 до 1500 м³/сек також є можливість підвищити швидкість проходження плями забруднення Дніпром за межі Києва – біля Південного мосту час добігу забруднення скоротився також на 34%.

За даними моніторингу Держекоінспекції України суттєвого зниження РК в Дніпрі в межах Києва восени 2024 року не спостерігалось. За рахунок розпаду органічного забруднення на шляху від гирла Сейму в Десні максимальні концентрації ХСК в гирлі Десни не перевищили 50 мгО/дм³ з відповідним розбавленням водами Дніпра нижче за течією. Розроблена модель може бути використана в подальшому для прогнозування забруднення р. Дніпро органічними речовинами, а після відповідного доповнення – й іншими видами забруднювальних речовин.

Таблиця 3. Параметри ефективності моделі паралельних обчислень забруднення Дніпра

Обладнання		Час розрахунку, хв	Прискорення	Прискорення відносно MPI
Dell 7920	Serial (1 ядро)	1921.56	1	
	MPI (32 ядра)	112.14	17.14	1
RTX 3080	DP	63.46	30.28	1.77
	SP	36.38	52.82	3.08

У Табл. 3 наведено тривалості моделювання базового 20-денного сценарію на графічній карті NVIDIA RTX 3080 та на 2-процесорній 40-ядерній робочій станції в непаралельному та паралельному (MPI) режимах при розмірі розрахункової сітки в 152 112 комірок на 135 км довжини розрахункової області. Паралельна MPI-версія прискорює розрахунок приблизно у 17 разів (за використання 32 ядер – оптимальної кількості), забезпечуючи прийнятний час обчислення – близько 112 хв. Обчислення на графічній карті виявилось ще швидшим – приблизно 64 хв у подвійній точності (DP) та 37 хв в одинарній точності (SP) (прискорення приблизно у 30 та 53 рази відповідно).

Висновки

Поєднання технологій MPI та OpenACC у паралельній реалізації моделюючої системи COASTOX-UN дозволило досягти високої обчислювальної ефективності при моделюванні транспорту наносів і розповсюдження забруднюючих речовин на деталізованих сітках. Тестування показало, що навіть побутові комп'ютери з потужними GPU перевершують за продуктивністю професійні робочі станції. Валідація моделі проведена за даними моніторингу ^{90}Sr під час весняної повені 1999 року. Систему також застосовано для кількісної оцінки зменшення концентрацій забруднювачів у водах р. Дніпро біля Києва при транскордонному надходженні речовин із гирла р. Десна. Отримані результати підтверджують можливість використання COASTOX-UN для оперативного прогнозування забруднення водойм, зокрема в умовах надзвичайних ситуацій. Подальші дослідження передбачають розширення функціоналу моделі для інших типів забруднювачів, зокрема важких металів, розробку рекомендацій щодо оптимізації управління водними ресурсами в умовах надзвичайних екологічних ситуацій, адаптацію моделі для потреб інших регіонів України, зокрема придунайських територій та басейну Дністра. Реалізація цих напрямів дозволить створити ефективний інструмент для підтримки прийняття рішень у сфері охорони водних ресурсів та запобігання екологічним катастрофам.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сорокін, М.В. (2023). Розпаралелювання чисельних розв'язків рівнянь мілкої води методом скінченних об'ємів для реалізації на багатопроцесорних системах і графічних процесорах. *Екологічна безпека та природокористування*, 46(2), 163–193. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.163-193>
2. Zheleznyak, M. J., Demchenko, R. I., Khursin, S. L., Kuzmenko, Y. I., Tkalic, P. V., Vitiuk, N. Y. (1992). Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripjat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident. *Science of The Total Environment*, 112(1), 89–114. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90241-j](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90241-j)
3. Zheleznyak, M., Kivva, S., Ievdin, I., Boyko, O., Kolomiets, P., Sorokin, M., Mikhalskyi, O., Gheorghiu, D. (2016). Hydrological dispersion module of JRODOS: renewed chain of the emergency response models of radionuclide dispersion through watersheds and rivers. *Radioprotection*, 51(HS2), S129–S131. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2016048>
4. Zheleznyak, M., Kivva, S., Pylypenko, O., Sorokin, M. (2022). Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems. In: Nanba, K., Konoplev, A., Wada, T. (eds) *Behavior of Radionuclides in the Environment III*. Springer, Singapore. 2022, 199–252. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6799-2_11.
5. Коцюруба, В., Прошин, І., Сорокін, М., Пилипенко, О. (2024) Удосконалена методика прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на гідротехнічних спорудах. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, 51(3), с. 5–14. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-51-3-5-14>
6. Vanzo, D., Peter S., Vonwiller L., Burgler M., Weberndorfer M., Siviglia A., Conde D., Vetsch D. (2021) Basement v3: a modular freeware for river process modelling over multiple computational backends. *Environmental Modelling Software*, 143, 105102. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105102>
7. Camenen, B., Larson, M. (2007). A Unified Sediment Transport Formulation for Coastal Inlet Application. ERDC/CH: CR-07-1, US Army Corps of Engineers, 247 p.

8. Zheleznyak, M., Donchytz, G., Hygynyak, V., Marinetz, A., Lyashenko, G., Tklich, P., Treebushny, D., Kovalets, I. (2003). RIVTOX – one dimensional model for the simulation of the transport of radionuclides in a network of river channels. RODOS Report WG4-TN(97)05, 52 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4071.8241>
9. IAEA (2006). Radiological Conditions in the Dnieper River Basin: Assessment by an international expert team and recommendations for an action plan. STI/PUB/1230, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. ISBN 92-0-104905-6, 200 p.
10. Voitsekhovitch, O., Zheleznyak, M. (2001). Countermeasure application, feasibility and analysis of their effectiveness as an aid for providing recommendations for improvement of modelling approaches: a Chernobyl case study. In: Implementing Computerised Methodologies to Evaluate the Effectiveness of Countermeasures for Restoring Radionuclide Contaminated Fresh Water Ecosystems, L. Monte (Ed.) ENEA. ISSN 1120 5555. 139-178.
11. Войцехович, О., Канівець, В., Кіреєв, С., Лаптев, Г., Обрізан С. (2016). Стан радіоактивного забруднення поверхневих вод. 30 Років Чорнобильської катастрофи (огляди). *Збірник інформаційно-аналітичних доповідей*. Київ: КІМ, 129-139.

Стаття надійшла до редакції 02.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 01.09.2025

REFERENCES

1. Sorokin, M. V. (2023). Parallelization of numerical solutions of shallow water equations by the finite volume method for implementation on multiprocessor systems and graphics processors. *Environmental Safety and Natural Resources*, 46(2), 163–193 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.163-193>
2. Zheleznyak, M. J., Demchenko, R. I., Khursin, S. L., Kuzmenko, Y. I., Tklich, P. V., Vitiuk, N. Y. (1992). Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripyat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident. *Science of The Total Environment*, 112(1), 89–114. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90241-j](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90241-j)
3. Zheleznyak, M., Kivva, S., Ievdin, I., Boyko, O., Kolomiets, P., Sorokin, M., Mikhalskyi, O., Gheorghiu, D. (2016). Hydrological dispersion module of JRODOS: renewed chain of the emergency response models of radionuclide dispersion through watersheds and rivers. *Radioprotection*, 51(HS2), S129–S131. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2016048>
4. Zheleznyak, M., Kivva, S., Pylypenko, O., Sorokin, M. (2022). Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems. In: Nanba, K., Konoplev, A., Wada, T. (eds) *Behavior of Radionuclides in the Environment III*. Springer, Singapore. 2022, 199–252. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6799-2_11.
5. Kotsyruba, V., Proshchyn, I., Sorokin, M. and Pylypenko, O. (2024). Improved method for forecasting the consequences of emergencies of a terrorist nature at hydraulic facilities. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 51(3), 5–14 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-51-3-5-14>
6. Vanzo, D., Peter, S., Vonwiller, L., Burgler, M., Weberndorfer, M., Siviglia, A., Conde, D., Vetsch, D. (2021). Basement v3: a modular freeware for river process modelling over multiple computational backends. *Environmental Modelling Software*, 143, 105102. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105102>
7. Camenen, B., Larson, M. (2007). A Unified Sediment Transport Formulation for Coastal Inlet Application. ERDC/CH: CR-07-1, US Army Corps of Engineers, 247 p.
8. Zheleznyak, M., Donchytz, G., Hygynyak, V., Marinetz, A., Lyashenko, G., Tklich, P., Treebushny, D., Kovalets, I. (2003). RIVTOX – one dimensional model for the simulation of the transport of radionuclides in a network of river channels. RODOS Report WG4-TN(97)05, 52 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4071.8241>

9. IAEA (2006). Radiological Conditions in the Dnieper River Basin: Assessment by an international expert team and recommendations for an action plan. STI/PUB/1230, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. ISBN 92-0-104905-6, 200 p.
10. Voitsekhovitch, O., Zheleznyak, M. (2001). Countermeasure application, feasibility and analysis of their effectiveness as an aid for providing recommendations for improvement of modelling approaches: a Chernobyl case study. In: Implementing Computerised Methodologies to Evaluate the Effectiveness of Countermeasures for Restoring Radionuclide Contaminated Fresh Water Ecosystems, L. Monte (Ed.) ENEA. ISSN 1120 5555. 139-178.
11. Voitsekhovitch, O., Kanivets, V., Kireev, S., Laptev, G., Obrizan, S. (2016). The state of radioactive contamination of surface waters. *30 Years of the Chornobyl Disaster (reviews). Collection of information and analytical reports*. Kyiv: KIM, 129-139 [in Ukrainian].

The article was received 02.06.2025 and was accepted after revision 01.09.2025

Сорокін Максим Вікторович

науковий співробітник Інституту проблем математичних машин і систем НАН України (ІПММС)

Адреса робоча: 03187 Україна, м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 42

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3165-6040> **e-mail:** maxim.sorockin@gmail.com

Железняк Марк Йосипович

кандидат фізико-математичних наук, професор Інституту радіоактивності навколишнього середовища Університету Фукусіма, Японія

Адреса робоча: 960-1296, Японія, м. Фукусіма, Канаягава, 1

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7723-6052> **e-mail:** zheleznyak.m@gmail.com

Ківва Сергій Леонідович

кандидат фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник ІПММС НАН України

Адреса робоча: 03187 Україна, м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 42

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8570-6579> **e-mail:** skivva@gmail.com

Пилипенко Олександр Ігорович

науковий співробітник ІПММС НАН України

Адреса робоча: 03187 Україна, м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 42

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6883-5018> **e-mail:** oi.pylypenko@gmail.com

UDK 004.42; 528.8; 551.46

Oleksiy Shundel, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher, Head of the Group of Geophysical Research Methods and Data Collection

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-9553> **e-mail:** lixyta666@gmail.com

Serhii Fedoseienkov, PhD (Geol.), Senior Researcher, Deputy Director for Scientific and Technical Work

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9576-2977> **e-mail:** 22lex22s@ukr.net

Svitlana Nevierova, Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-7472-4776> **e-mail:** sidzp2019@gmail.com

Nataliia Speranska, Leading Engineer

e-mail: natsp_78@ukr.net

State Scientific Institution "Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR AUTOMATED GENERATION OF GEOSPATIAL *GEOTIFF* DATA OF HYDROACOUSTIC ECHOGRAMS FOR THE MODULE OF THE OCEANOGRAPHIC DATA BANK OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE

Abstract. *This article presents the development of software designed for the automated generation of geospatial data from hydroacoustic echograms obtained via side-scan sonar (SSS). SSS is a key tool for mapping the underwater environment, allowing for high-resolution echograms of the bottom and coastal zone. The combination of SSS data with satellite navigation (GPS) creates conditions for an accurate geospatial representation of underwater features, which is critical for oceanographic research, engineering work and environmental monitoring. Software processing of "raw" (initial) SSS data requires several stages: separation of port and starboard channels, reading GPS tags, smoothing the ship's track and converting echogram pixels into a georeferenced raster. The primary objective is to create a tool that facilitates efficient processing and visualization of SSS data, enabling the georeferencing of results in the GeoTIFF format. The developed software implements algorithms for preliminary signal processing, noise filtering, coordinate transformation, and the automatic creation of echogram mosaics. The practical application of this tool is demonstrated through a case study of surveying a section of the Dnipro River channel, resulting in high-quality geospatial images of the riverbed. The outcomes indicate the effectiveness of the proposed approach for integrating hydroacoustic data into geographic information systems (GIS), thereby opening new opportunities for monitoring aquatic ecosystems and supporting scientific research in the field of oceanography.*

Keywords: *hydroacoustics, side-scan sonar, echogram, GeoTIFF, geospatial data, automated processing, geographic information systems, aquatic ecosystem monitoring, oceanographic data, software.*

О.І. Шундель, С.Г. Федосєєнков, С.І. Невєрова, Н.А. Сперанська

Державна наукова установа “Центр проблем морської геології, геоєкології та осадового рудоутворення НАН України”, м. Київ, Україна

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ФОРМУВАННЯ ГЕОПРОСТОРОВИХ GEOTIFF-ДАНИХ ГІДРОАКУСТИЧНИХ ЕХОГРАМ ДЛЯ МОДУЛЯ БАНКУ ОКЕАНОГРАФІЧНИХ ДАНИХ НАН УКРАЇНИ

Анотація. У статті представлено розробку програмного забезпечення для автоматизованого формування геопросторових даних з гідроакустичних ехограм, отриманих за допомогою гідролокатора бокового огляду (ГБО). ГБО є ключовим інструментом для картографії підводного середовища, що дозволяє отримувати високороздільні ехограми дна та берегової зони. Поєднання даних ГБО із супутниковою навігацією (GPS) створює умови для точного геопросторового представлення підводних особливостей, що є критично важливими для океанографічних досліджень, інженерних робіт та екологічного моніторингу. Програмна обробка «сирих» (вихідних) даних ГБО вимагає кількох етапів: виділення каналів лівого та правого борту, зчитування GPS-тегів, згладжування суднового треку та перетворення пікселів ехограми у растр із геоприв'язкою. Метою дослідження є створення інструменту, що забезпечує ефективну обробку та візуалізацію даних ГБО з подальшою геоприв'язкою результатів у форматі GeoTIFF. Розроблене програмне забезпечення реалізує алгоритми попередньої обробки сигналів, фільтрації шумів, трансформації координат та автоматичного формування мозаїк ехограм. Практичне застосування інструменту продемонстровано на прикладі обстеження ділянки русла річки Дніпро, де отримано високоякісні геопросторові зображення дна. Результати свідчать про ефективність запропонованого підходу для інтеграції гідроакустичних даних у геоінформаційні системи, що відкриває нові можливості для моніторингу водних екосистем та підтримки наукових досліджень у галузі океанографії.

Ключові слова: гідроакустика, гідролокатор бокового огляду, ехограма, GeoTIFF, геопросторові дані, автоматизована обробка, геоінформаційні системи, моніторинг водних екосистем, океанографічні дані, програмне забезпечення.

[https:// doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.76-86](https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.76-86)

Вступ

Гідроакустичні системи бокового огляду (ГБО) є ключовим інструментом для картографії підводного середовища, що дозволяє отримувати високороздільні ехограми дна та берегової зони. Поєднання даних ГБО із супутниковою навігацією (GPS) створює умови для точного геопросторового представлення підводних особливостей, що є критично важливими для океанографічних досліджень, інженерних робіт та екологічного моніторингу [1-5].

Програмна обробка «сирих» (вихідних) даних ГБО вимагає кількох етапів: виділення каналів лівого та правого борту, зчитування GPS-тегів, згладжування суднового треку та перетворення пікселів ехограми у растр із геоприв'язкою. Традиційні підходи часто передбачають ручні кроки та розрізнені скрипти, що знижує ефективність та уніфікацію даних.

У зв'язку з цим постає завдання розробити єдиний застосунок, який дозволить автоматизувати конвертацію гідроакустичних та *GPS*-даних у стандартизований геопросторовий формат *GeoTIFF* [6-8]. Це сприятиме оперативному оновленню Банку океанографічних даних НАН України та полегшить інтеграцію результатів вимірювань у *GIS*-клієнти, такі як *QGIS* чи *ArcGIS* [9-11]. Технічні деталі розробленого рішення та ключові алгоритми описані у наступних розділах роботи.

Основною метою цієї роботи є розробка *MATLAB*-застосунку *mapGBO* для автоматизованого формування геопросторових *GeoTIFF*-даних гідроакустичних ехограм із урахуванням таких завдань:

- Розробити алгоритм синхронізації та коректного зчитування «сирих» (вихідних) даних бокового огляду ГБО та *GPS* для забезпечення точності просторового розташування сигналу.
- Реалізувати методи згладжування траєкторії судна (рухоме середнє) та фільтрації вібраційних шумів для підвищення якості геоприв'язки.
- Створити процедуру побудови координатної сітки (*LatGrid*, *LonGrid*) та присвоєння пікселям ехограми відповідних географічних координат.
- Забезпечити експорт оброблених даних у стандартизований растровий формат *GeoTIFF* із вбудованою палітрою кольорів для сумісності з *GIS*-системами (*QGIS*, *ArcGIS*).
- Розробити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс вибору вхідних файлів (*.dat) та налаштувань роботи модуля.

Досягнення цих завдань сприятиме підвищенню оперативності та стандартизації обробки гідроакустичних даних у рамках інформаційного модуля Банку океанографічних даних НАН України.

Результати дослідження

Загальна архітектура програмного забезпечення

Програмне забезпечення *mapGBO*, реалізоване у середовищі *MATLAB*, побудовано як монолітний, але логічно поділений скрипт, що виконує повний цикл обробки гідроакустичних та *GPS*-даних. Архітектура рішення орієнтована на поетапну обробку інформації з послідовним проходженням через основні функціональні блоки, що забезпечують зчитування, аналіз, просторову обробку та візуалізацію даних.

Роботу програми починає блок ініціалізації, в якому користувач задає режим роботи через набір спеціальних прапорців. Зокрема, змінна *flag_MC6* дозволяє враховувати специфіку форматів даних, що залежать від типу модуля сполучення (MC6 або MC7), тоді як *flag_LB* і *flag_RB* активують обробку лівого або правого борту гідролокатора відповідно. Крім того, передбачена можливість згладжування траєкторії (*flag_filt*) та інверсії борту (*flag_flip*) у разі потреби. На цьому етапі також програма завантажує палітру кольорів для подальшої візуалізації ехограм за допомогою спеціальної функції *LoadPalette()*.

Наступним кроком є інтерфейс завантаження вхідних даних, де за допомогою інтерактивного вікна *uigetfile* користувач вибирає один або кілька *.dat-файлів. Після цього прогрес-бар *waitbar* інформує користувача про перебіг обробки. Впродовж послідовного зчитування файлу програма виконує пошук спеціального маркера "Event", що відмічає початок структурованої частини даних. До цього моменту програма пропускає службову частину заголовка.

Далі програмне забезпечення виконує зчитування метаданих: розміру вибірки, кількості відліків, діапазону сканування і на основі цих параметрів формує структуру очікуваних даних. Після цього скрипт обробляє сам сигнал, здійснюючи індексацію окремих блоків – каналів лівого і правого борту (*indLeftBort*, *indRightBort*) та координат *GPS* (*indGPS*). Індексація дозволяє організувати синхронізацію даних між ехограмою та навігаційною інформацією, що є критично важливою для точної геопросторової прив'язки.

GPS-дані перетворюють з внутрішнього формату у координати в градусах, після чого програма виконує згладжування маршруту та інтерполяцію треку між координатами. На основі цього скрипт будує сітку з рівномірним кроком по широті та довготі, в яку вставляє значення ехограм. Після отримання кожним пікселем своїх координат програма формує підсумкову карту, яку експортує у формат *GeoTIFF* [2, 7] з відповідною кольоровою палітрою.

Таким чином, архітектура програми реалізує повний ланцюг обробки – від відкриття «сирого» файлу до отримання готового геопросторового растрового зображення. Всі етапи побудовані у вигляді логічно послідовних блоків і реалізовані у вигляді єдиного *MATLAB*-скрипта, що дозволяє легко адаптувати або розширити функціональність рішення у майбутньому.

Алгоритм зчитування та первинної обробки даних

Обробку гідроакустичних даних розпочинає процес зчитування структурованих бінарних файлів формату **.dat*, які містять записи сигналів бокового огляду та супутніх *GPS*-координат. Файл містить послідовність різних типів блоків даних: службових, навігаційних, а також сигналів з лівого та правого борту. Для коректної обробки необхідно правильно виявити та інтерпретувати ці блоки, дотримуючись послідовності операцій, закладеної у формат.

Першим етапом є визначення точки входу до корисних даних шляхом пошуку у файлі сигнатури *'Event'*, яка є маркером початку блоку з основними структурованими записами. Усі байти до цієї позиції програма ігнорує як службову інформацію. Після виявлення сигнатури скрипт зчитує набір заголовків, які містять ключові параметри для розуміння формату вибірки.

Одним з перших параметрів є розмір одного вимірювання сигналу у бітах – його програма зчитує як ціле число та приводить до значення у байтах діленням на 8:

$$N_s = \frac{DS}{8},$$

де *DS* – кількість бітів для одного фрагмента сигналу.

Далі визначають кількість відліків у кожній реалізації сигналу. Цей параметр може відрізнятися залежно від типу використаного модуля запису, наприклад, для модулів *MC6* характерне додаткове службове поле, яке необхідно компенсувати:

$$N_r = \begin{cases} NVyborok - 64, & \text{якщо використовується модуль } MC6 \\ NVyborok, & \text{для } MC7 \text{ або інших модулів} \end{cases}.$$

Наступним етапом є зчитування глибини охоплення сигналу або його діапазону, яку визначають у метрах із врахуванням масштабного коефіцієнта:

$$D = \frac{Diap \cdot 1.5}{2} [\text{м}],$$

де $Diap$ – значення, отримане з заголовка блоку даних.

Після отримання базових параметрів вибірки програма виконує повторний обхід файлу з метою індексації початкових позицій даних для кожного типу сигналу. Для кожного блоку маємо перевірку його типу – і якщо він відповідає блоку з лівого або правого борту ГБО, або блоку з GPS -координатами – відповідний байтовий індекс додає до списку: $indLeftBort$, $indRightBort$ або $indGPS$. Ці індекси підлягають збереженню у пам'яті для подальшої синхронізації сигналу з координатами.

Нарешті, дані GPS перетворюють з цілочисельного формату у десяткові градуси. Для кожного блоку GPS зчитують значення широти ($Shir$) та довготи ($Dovg$), що представлені у сотих частках кутової хвилини. Їх перетворення у десяткову систему координат виконують за формулою:

$$\varphi_i = \frac{Shir_i}{60000}, \quad \lambda_i = \frac{Dovg_i}{60000}.$$

Це дозволяє отримати координати, сумісні зі стандартними системами географічного позиціонування ($WGS-84$), та використовувати їх для геоприв'язки сигналів.

Таким чином, на виході з цього етапу ми маємо: координати треку руху судна, параметри структури сигналу та позиції у файлі, що відповідають кожному блоку з даними. Ці відомості використовують на наступному етапі – геопросторовому проектуванні ехограм.

Геоприв'язка ехограм

Після зчитування сигналів гідролокатора бокового огляду та супутникових координат із GPS , програма виконує ключову операцію – просторове проектування ехограми на поверхню Землі. Цей процес дозволяє кожному пікселю ехограми приписати точну географічну координату, що забезпечує можливість подальшого аналізу та інтеграції в геоінформаційні системи.

Перед початком геоприв'язки координати GPS проходять попереднє згладжування для усунення випадкових вібрацій та коливань траєкторії судна. Згладжування виконано за допомогою методу ковзного середнього з фіксованим вікном ширини $2k+1$, де $k = 7$. В результаті програма обчислює усереднені значення координат у точках маршруту:

$$\tilde{\varphi}_i = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} \varphi_j, \quad \tilde{\lambda}_i = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} \lambda_j,$$

де φ_i , λ_i – широта і довгота в i -й точці треку.

Застосування цього фільтра значно покращує плавність траєкторії й дозволяє уникнути спотворень при побудові інтерпольованої сітки координат.

Між кожною парою *GPS*-точок виконано лінійну інтерполяцію координат для побудови проміжних позицій пікселів ехограми. Це реалізовано через функцію *track2*, яка генерує задану кількість рівномірно розподілених точок на сферичній поверхні між початковою і кінцевою позицією. Таким чином, маємо сформовану повну траєкторію, що покриває усю довжину галсу, із просторово узгодженими точками.

Після побудови траєкторії програма формує регулярну координатну сітку, в межах якої буде зберігатися ехограма. Сітку створено на основі мінімального та максимального значення широти і довготи з відповідними кроками дискретизації $\Delta\varphi$ і $\Delta\lambda$, які зазвичай відповідають просторовому розділенню даних (наприклад, 0.0002 градуси):

$$\begin{aligned} LatGrid &= \min(\tilde{\varphi}) : \Delta\varphi : \max(\tilde{\varphi}), \\ LonGrid &= \min(\tilde{\lambda}) : \Delta\lambda : \max(\tilde{\lambda}). \end{aligned}$$

Кожному пікселю ехограми, що має координати (φ, λ) , програма знаходить відповідні індекси у координатній сітці за принципом мінімального відхилення:

$$\begin{aligned} i &= \arg \min |LatGrid - \varphi|, \\ j &= \arg \min |LonGrid - \lambda|. \end{aligned}$$

Амплітудне значення сигналу, пов'язане з цим пікселем, програма записує у відповідну комірку матриці *MAP*, яка відображає повне геопросторове представлення гідроакустичних даних у вигляді двовимірного растрового зображення:

$$MAP(i, j) = Z,$$

де Z – інтенсивність сигналу в даній точці.

В результаті цієї процедури отримаємо сформовану геореферовану матрицю ехограми, яка готова до візуалізації та експорту у форматі *GeoTIFF* [2, 7]. Візуальне розташування ехограм у географічному просторі дозволяє проводити точний аналіз рельєфу дна, ідентифікацію підводних об'єктів та інтеграцію з іншими джерелами просторових даних.

Формат *GeoTIFF* та геореференс

Після формування матриці значень ехограми з географічною прив'язкою наступним етапом є експорт цієї інформації у стандартизований формат зберігання – *GeoTIFF*. Цей формат є різновидом *TIFF*-файлів, що містять метадані про географічне положення кожного пікселя, включаючи проекцію, межі координат та просторову роздільну здатність. *GeoTIFF* – є одним із базових форматів для роботи у сучасних геоінформаційних системах (ГІС, *GIS*), таких як *ArcGIS*, *QGIS*, *Global Mapper* та ін. [10].

Створену матрицю *MAP*, яка відображає амплітуду сигналу для кожної координати, скрипт зберігає разом із геопросторовою інформацією шляхом створення геореференсної структури за допомогою функції *georasterref*. Цей об'єкт визначає прив'язку пікселів растрового зображення до географічної широти та довготи, а також межі покриття зображення. Таким чином, кожен піксель зображення чітко видно на місцевості.

Для збереження зображення застосовано функцію *geotiffwrite*, яка приймає матрицю значень, геореференс та палітру кольорів.

Функція перетворює числові значення у 8-бітне зображення (*uint8*), накладає відповідну кольорову шкалу (яку за замовчуванням завантажено з файлу палітри **.npal*) і створює на виході файл з розширенням **.tif*. Такий файл є повністю сумісним з більшістю програмних пакетів ГІС і може використовуватись для подальшого аналізу, побудови профілів глибини, тривимірної візуалізації або об'єднання з іншими шарами просторових даних.

GeoTIFF-файли підлягають автоматичному зберіганню у підкаталозі *GeoTiff*, який створює програма в директорії, де розміщено вхідні **.dat* файли, що дозволяє зберігати результати обробки в організованому вигляді і спрощує їх подальше використання в інформаційних системах.

Таким чином, завершальним етапом обробки є генерація геоприв'язаного зображення ехограми у форматі *GeoTIFF*, що робить результат сумісним із сучасною цифровою картографією та відкриває можливості для інтеграції у великі просторові бази даних, зокрема – у Банк океанографічних даних НАН України. Формат *GeoTIFF* [2, 7] забезпечує збереження амплітудних характеристик сигналу, а також повну просторову інтеграцію отриманих даних із географічними координатами, що дозволяє безпосередньо аналізувати результати гідроакустичного зондування в середовищах *GIS* та інтегрувати їх з іншими типами геопросторової інформації.

Приклад практичного застосування

Ефективність розробленого *MATLAB*-застосунку була доведена на реальних польових даних, зібраних під час панорамної гідролокаційної зйомки дна ділянки Дніпра в межах руслового зниження поблизу острова Білий, південніше о. Хортиця.

Використано «сирі» (вихідні) записи гідролокатора бокового огляду, який працював у двоканальному режимі (лівий та правий борти) із супутнім записом *GPS*-трека. Вихідна ехограма є джерелом інформації про підводне середовище й містить усі характерні гідроакустичні характеристики: зону акустичної тіні, глибину води, геометрію траєкторії, деталізовані структури рельєфу дна, акустичну відбивну здатність поверхні.

На рис. 1 представлено ехограму, збудовану до просторової обробки, з використанням бронзової палітри відтінків, що дозволяє чітко візуалізувати зміни інтенсивності зворотного акустичного сигналу. Також на ехограмі чітко спостерігаються зміни рельєфу дна, а завдяки високій роздільній здатності виявляються окремі аномальні об'єкти (природного та штучного походження), наприклад ніс затонулої баржі.

За допомогою створеного *MATLAB*-застосунку проведено обробку гідроакустичних даних вихідної ехограми з рис. 1.

На першому етапі за допомогою інструменту *mapGBO* виконано автоматичне зчитування структури файлу, визначення параметрів сигналу, ідентифікацію блоків ехограм та прив'язку до координат.

Після застосування фільтрації траєкторії і згладжування було побудовано рівномірну координатну сітку та сформовано повну ехограму, зібрану з усіх фрагментів галсу.

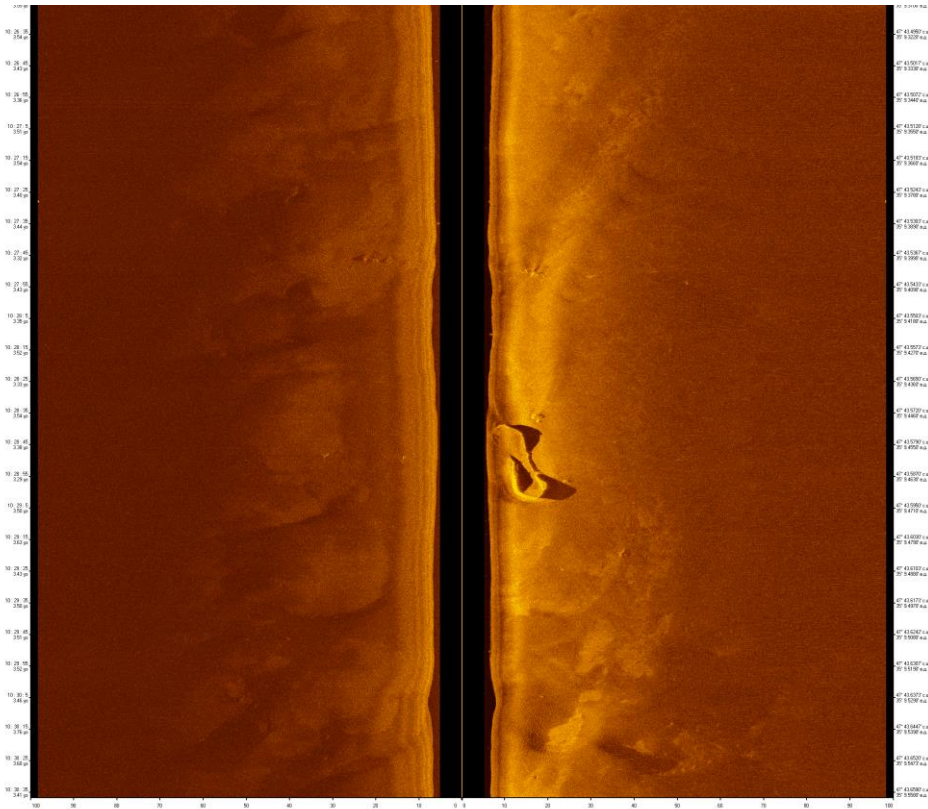


Рис. 1. Вихідна ехограма з детальною структурою рельєфу дна річки Дніпро

На рис. 2 представлено результат експорту ехограми у форматі *GeoTIFF* з накладенням на супутникову карту, на якому видно чітке розташування структури дна, а також особливості берегової лінії, що дозволяє легко зіставити ехограму з реальними географічними об'єктами.

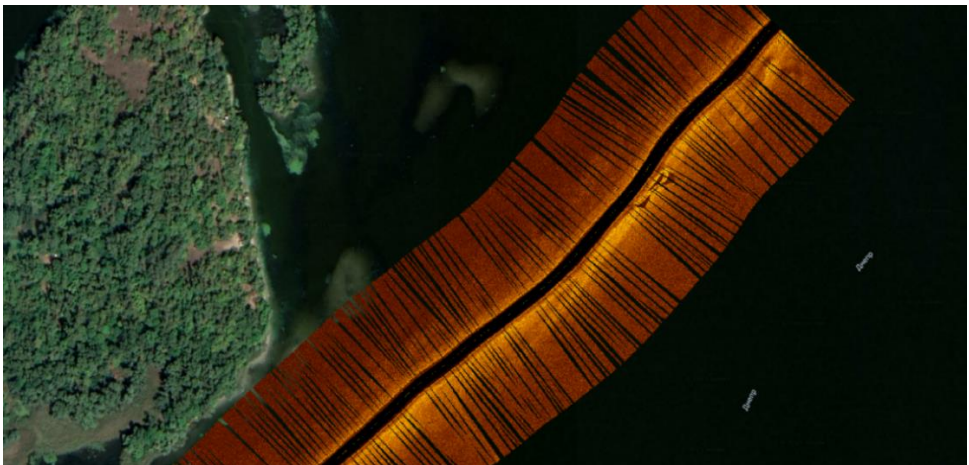


Рис. 2. Мозаїка зображення дна, згенерована з даних гідролокатора бокового огляду, накладена на супутникову підкладку (*GeoTIFF*)

Така геоприв'язка має ключове значення для екологічного аналізу, виявлення змін у морфології дна та побудови тематичних шарів у *GIS*-середовищі.

Цей приклад демонструє не лише технічну ефективність застосунку, а й його практичну придатність для вирішення широкого спектру прикладних задач – від картографії дна до обстеження підводних інженерних споруд, зокрема у важкодоступних районах внутрішніх водойм.

Отримані результати у форматі *GeoTIFF* були успішно імпортовані у середовище *QGIS* без додаткового редагування, що підтверджує повну сумісність формату вихідних файлів із сучасними геоінформаційними платформами.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У межах цієї роботи було реалізовано інструмент автоматизованої обробки даних гідролокатора бокового огляду, що дозволяє значно пришвидшити та спростити побудову геопросторових продуктів для подальшого аналізу. Особливу увагу приділено попередній фільтрації, класифікації та трансформації даних у зручні для візуалізації формати, зокрема *GeoTIFF*. Запропоноване рішення забезпечує сумісність із популярними геоінформаційними системами [12, 13], що відкриває широкі можливості інтеграції результатів у різні типи досліджень – від екологічного моніторингу до пошуково-рятувальних операцій.

Практичне застосування інструментарію продемонструвало його ефективність у реальних умовах на прикладі обстеження ділянки русла Дніпра. Висока якість результатів та їх геопросторова точність свідчать про потенціал впровадження запропонованого підходу у широку практику підводного моніторингу, зокрема в умовах обмежених ресурсів та потреби у швидкому прийнятті рішень.

У перспективі подальших досліджень заплановано розширення функціоналу програми з урахуванням додаткових форматів вхідних даних, автоматизованого виявлення аномальних об'єктів та інтеграції з хмарними ГІС-платформами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Щипцов, А.А., Шнюков, Е.Ф., Коболев, В.П., & Лебедь, А.Г. (1996). Комплексные экспедиционные исследования 4-го рейса НИС «Киев». *Геофиз. журн.*, 18 (4), 83–84.
2. *GeoTIFF standard: OGC publications*. Open Geospatial Consortium. (27 січня 2025). <https://www.ogc.org/standards/geotiff/>
3. Hydroacoustic Data Processing – Echoview. Echoview. <https://echoview.com/>
4. Savenko, O. (15 січня 2020). Research and Conservation of Marine Mammals and Birds of the Black Sea. Oksana Savenko, Ukraine. <https://community.esri.com/t5/conservation-gis/oksana-savenko-ukraine/ba-p/893121>
5. Трофимчук, О.М., Триснюк, В.М., Анпілова, Є.С., Бутенко, О.С., Вишняков, В.Ю., Загородня, С.А., Клименко, В.І., Ключко, Т.О., Красовська, І.Г., Крета, Д.Л., Миронцов, М.Л., Охарев, В.О., & Попова, М.А. (2022). *Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування*. Івано-Франківськ: Супрун В.П. <https://itgip.org/geoinformation-research-of-aquatic-ecosystems-of-ukraine-monitoring-and-forecasting/>

6. Godlewska, M., & Ye, S. (2023). Hydroacoustics in Marine, Transitional and Freshwaters. *Water*, 15(9), 1674. <https://doi.org/10.3390/w15091674>
7. *OGC Cloud Optimized GeoTIFF Standard*. (14 липня 2023). OGC Public Document Repository – Open Geospatial Consortium. <https://docs.ogc.org/is/21-026/21-026.html>
8. Mapping Ukraine's ecologically important areas – CEOBS. (жовтень 2023). *CEOBS*. <https://ceobs.org/mapping-ukraines-ecologically-important-areas/>
9. *Ukraine Data Hub*. Ukraine Data Hub. <https://ukraine-data-hub-t-rex.hub.arcgis.com/>
10. *Ukrainian open initiative of creating tools for spatial planning in the QGIS environment QGIS Web Site*. Spatial without Compromise QGIS Web Site. https://qgis.org/project/case-studies/ukrainian_spt/
11. Jacek Łubczonek & Witold Kazimierski, Grzegorz Zaniewicz. (2022). Development of digital bathymetric models from hydroacoustic and photogrammetric data. *Hydro International*, (2), 14–15.
12. Щипцов, О., Гордеев, А., Лебідь, О., Охарєв, В., Теличко, Р., Федосєєнков, С., & Шундель, О. (2023). Інформаційні технології в задачах автоматизації моделювання та прогнозування гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря. *Екологічна безпека та природокористування*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>
13. Лебідь, О., Охарєв, В., Федосєєнков, С., Шундель, О., Теличко, Р., & Клименков, О. (2023). Геоінформаційні технології екологічного моніторингу акваторії Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС. *Екологічна безпека та природокористування*, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144>

Стаття надійшла до редакції 09.05.2025 і прийнята до друку після рецензування 24.07.2025

REFERENCES

1. Shhipcov, A.A., Shnjukov, E.F., Kobolev, V.P., & Lebed', A.G. (1996). Kompleksnyye jekspedicionnye issledovaniya 4-go rejsa NIS «Kiev» [Complex expeditionary research of the 4th cruise of the NIS "Kiev"]. *Geofiz. zhurn.*, 18 (4), 83-84 [in Russian].
2. *GeoTIFF standard: OGC publications*. Open Geospatial Consortium. (2025, January 27). Retrieved from <https://www.ogc.org/standards/geotiff/>
3. *Hydroacoustic Data Processing – Echoview*. (n.d.). Echoview. Retrieved from <https://echoview.com/>
4. Savenko, O. (2020, January 15). Research and Conservation of Marine Mammals and Birds of the Black Sea. Retrieved from <https://community.esri.com/t5/conservation-gis/oksana-savenko-ukraine/ba-p/893121>
5. Trofymchuk, O.M., Trysniuk, V.M., Anpilova, Ye.S., Butenko, O.S., Vyshniakov, V.Yu., Zahorodnia, S.A., Klymenko, V.I., Klochko, T.O., Krasovska, I.H., Kreta, D.L., Myrontsov, M.L., Okhariev, V.O., & Popova, M.A. (2022). Heoinformatsiini doslidzhennia vodnykh ekosystem Ukrainy: monitorynh ta prohnozuvannia. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. Retrieved from <https://itgip.org/geoinformation-research-of-aquatic-ecosystems-of-ukraine-monitoring-and-forecasting/> [in Ukrainian].
6. Godlewska, M., & Ye, S. (2023). Hydroacoustics in Marine, Transitional and Freshwaters. *Water*, 15(9), 1674. <https://doi.org/10.3390/w15091674>
7. *OGC Cloud Optimized GeoTIFF Standard*. (2023, Jul 14). OGC Public Document Repository – Open Geospatial Consortium. Retrieved from <https://docs.ogc.org/is/21-026/21-026.html>
8. Mapping Ukraine's ecologically important areas – CEOBS. (2023, Oct). *CEOBS*. Retrieved from <https://ceobs.org/mapping-ukraines-ecologically-important-areas/>
9. *Ukraine Data Hub*. (n.d.). Ukraine Data Hub. Retrieved from <https://ukraine-data-hub-t-rex.hub.arcgis.com/>

10. *Ukrainian open initiative of creating tools for spatial planning in the QGIS environment QGIS Web Site.* (n.d.). Spatial without Compromise QGIS Web Site. Retrieved from https://qgis.org/project/case-studies/ukrainian_spt/
11. Jacek Łubczonek & Witold Kazimierski, Grzegorz Zaniewicz. (2022). Development of digital bathymetric models from hydroacoustic and photogrammetric data. *Hydro International*, (2), 14–15.
12. Shyptsov, O. A., Gordeev, A. Y., Lebid, O. H., Okhariev, V. O., Telychko, R. I., Fedoseienkov, S. H., & Shundel, O. I. (2023). Information technologies for automation of hydrophysical situation modelling and forecasting in the Black Sea region. *Environmental Safety and Natural Resources*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103> [in Ukrainian].
13. Lebid, O. H., Okhariev, V. O., Fedoseienkov, S. H., Shundel, O. I., Telychko, R. I., & Klimenkov, O. A. (2023). Geoinformation technologies of environmental monitoring in the Black Sea after Kakhovska hydroelectric power plant disaster. *Environmental Safety and Natural Resources*, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144> [in Ukrainian].

The article was received 09.05.2025 and was accepted after revision 24.07.2025

Шундель Олексій Іванович

кандидат фізико-математичних наук, керівник групи геофізичних методів досліджень і збору даних відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України»

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-9553> **e-mail:** lixyta666@gmail.com

Федосєнков Сергій Геннадійович

кандидат геологічних наук, заступник директора з науково-технічної роботи Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України»

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9576-2977> **e-mail:** 22lex22s@ukr.net

Неверова Світлана Іванівна

науковий співробітник групи геофізичних методів досліджень і збору даних відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України»

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-7472-4776> **e-mail:** sidzp2019@gmail.com

Сперанська Наталія Аркадіївна

провідний інженер групи геофізичних методів досліджень і збору даних відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України»

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

e-mail: natsp_78@ukr.net

УДК 502.51:504

Viacheslav Okhariev, Candidate of Engineering Science, Senior Researcher
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> **e-mail:** okhariev.vo@gmail.com

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

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

GEOINFORMATION TECHNOLOGY FOR LAND USE DYNAMICS MONITORING BASED ON THE ANALYSIS OF SATELLITE IMAGES

Abstract. *Changes in land cover have a significant impact on the global climate balance. Rational and balanced use of land resources is one of the key factors in reducing the negative impact of economic activity on climate change. Modern methods of remote sensing of the Earth allow for a comprehensive analysis of land use processes. Today, there are a number of products that provide land use classification based on open high-precision satellite images, in particular the Dynamic World (DW) dataset with a spatial resolution of 10 m. The purpose of this study is to assess the dynamics of land use in Ukraine, namely changes in the areas of vegetation classes and those used for growing crops, which may contribute to an increase in CO₂ emissions into the atmosphere. This study analyzed Dynamic World land use classifications for the territory of Ukraine for 2017 and 2024. Despite the accuracy declared by the company at 73%, a separate reliability assessment was performed specifically for the territory of Ukraine. Based on a stratified sample, it was determined that the overall accuracy of the classification for 2024 is 51.15%, and the Kappa coefficient is 0.44, which is significantly lower than the officially published indicators. Taking into account the specifics of the territory, the nature of land use and the limited sample for 2017, an analysis of the dynamics of land use areas was conducted. Two groups of classes were considered: on the one hand, lands with different types of vegetation cover (trees, grasses, wetlands, shrubs), on the other hand, territories of active agricultural use with open soils (crops). An error-adjusted area estimation was carried out in the interaction of the crops class and classes with vegetation cover, and the results were corrected using a confidence interval and bootstrap analysis. This allowed us to take into account the impact of the reduced accuracy of DW classifications and the limitations of the stratified verification sample. The results showed a potential trend of the transition of classes with vegetation cover to the category of open soils, which may be associated with an increase in the intensity of agricultural land use. This, in turn, creates risks for the balance of emissions and assimilation of greenhouse gases.*

Keywords: *geographic information technology, land use, satellite image, error-adjusted data estimation, bootstrap analysis.*

В.О. Охарєв, С.Г. Підсадний

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

ГЕОІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ДИНАМІКИ СТРУКТУРИ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

***Анотація.** Зміни в земному покриві мають істотний вплив на глобальний кліматичний баланс. Раціональне та збалансоване використання земельних ресурсів є одним із ключових чинників зниження негативного впливу господарської діяльності на кліматичні зміни. Сучасні методи дистанційного зондування Землі дають змогу здійснювати комплексний аналіз процесів землекористування. Сьогодні існує низка продуктів, що забезпечують класифікацію землекористування на основі відкритих високоточних супутникових знімків, зокрема набір даних Dynamic World (DW) із просторовою роздільною здатністю 10 м. У даному дослідженні проведено аналіз класифікацій землекористування Dynamic World для території України за 2017 та 2024 роки. Незважаючи на заявлену компанією точність на рівні 73%, було окремо виконано оцінку достовірності саме для території України. На основі стратифікованої вибірки визначено, що загальна точність класифікації за 2024 рік становить 51,15%, а коефіцієнт Каппа – 0,44, що є суттєво нижчим за офіційно опубліковані показники. Беручи до уваги специфіку території, характер господарського використання земель та обмежену вибірку для 2017 року, було проведено аналіз динаміки площ землекористування. Розглядалися дві групи класів: з одного боку – землі з рослинним покривом різного типу (дерева, трави, заболочена рослинність, чагарники), з іншого – території активного сільськогосподарського використання з відкритими ґрунтами (crops). Проведено неупереджену оцінку зміни площ у взаємодії класу crops та класів з рослинним покривом та корекцію результатів за допомогою довірчого інтервалу та бутстреп-аналізу. Це дозволило врахувати вплив зниженої точності класифікацій DW та обмеженості стратифікованої верифікаційної вибірки. Результати засвідчили потенційну тенденцію переходу класів із рослинним покривом у категорії відкритих ґрунтів, що може бути пов'язано зі зростанням інтенсивності аграрного землекористування. Це, своєю чергою, створює ризики для балансу емісії та асиміляції парникових газів.*

***Ключові слова:** геоінформаційні технології, землекористування, супутникові зображення, неупереджена оцінка зміни площ, бутстреп-аналіз.*

[https:// doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.87-96](https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.87-96)

Вступ

Для забезпечення раціонального землекористування нашої країни важливим є розуміння тенденцій його розвитку. Як видно із щорічного національного звіту про інвентаризацію парникових газів (ПГ) від природи до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату та Паризької угоди від 2024 року, загалом сектор землекористування став поглиначем CO₂, хоча і втратив в цьому показнику порівняно з 1990 роком -32,1 Mt CO₂-екв. [1]. Проте рілля за цей же період від поглинача (20,2 Mt CO₂-екв.) стала джерелом викидів (19,3 Mt CO₂-екв.). Основною причиною вважають зміну системи управління сільським

господарством, площі, врожайність, структури посівів і обсяг добрив [2]. Додатковим чинником є низький рівень обізнаності громадян щодо механізмів реалізації їхніх прав у сфері землекористування, ефективного розпорядження земельно-ресурсним потенціалом в умовах функціонування ринку землі [3]. Враховуючи втрату статусу поглинача угіддями в Україні та великого запасу вуглецю в ґрунтах [4], розширення територій орних земель є потенційним джерелом збільшення емісії ПГ. На сьогодні в структурі викидів таким територіям відводять близько 1%. Проте існують дослідження [5, 6], які доводять, що цей показник може бути вищий у 8 і навіть більше разів. Так само викиди при конверсії класів з рослинністю в рілля можуть мати показники “шокових” викидів більші в десятки разів за стандартні оцінки викидів стабільного стану функціонування орних угідь [7]. Дослідження можливості переведення угідь з одного типу в інший теж доводить високий потенціал збільшення емісії при переході інших типів в рілля [8]. Таким чином, виникає необхідність розробки систем моніторингу за динамікою землекористування, виявлення тенденцій їх використання та інформаційної підтримки прийняття рішень. Особливу увагу тут варто приділити ролі геопросторових даних і геоінформаційних систем (ГІС), які дають можливість своєчасного аналізу та реакції на потенційні загрози в рамках екологічної безпеки [9]. Разом з тим, застосування ГІС-даних дистанційного зондування землі та вже готових моделей, створених на їх основі, покращує ефективність моніторингу та аналізу. Метою даного дослідження є оцінка динаміки землекористування на території України, а саме зміни площ класів з рослинністю та тих, що використовуються для вирощування культур, що може сприяти збільшенню емісії CO₂ в атмосферу.

Підготовка даних

На сьогоднішній день існує низка готових рішень щодо класифікацій земельного покриття, наданих компаніями, які займаються обробкою даних дистанційного зондування землі та геоінформаційною аналітикою, зокрема і в сфері землекористування та земельного покриття. Важливим критерієм вибору джерела даних було використання даних класифікації земної поверхні (LULC) за максимально широким періодом. Серед джерел потрібно виділити ESRI 2020 Land Cover (ELC) від компанії ESRI [10] та Dynamic World (DW), класифікація земної поверхні у яких побудована на знімках достатньо високої роздільності здатності, а саме Sentinel-2 з роздільною здатністю 10 м за період з 2015 до 2025 року. Масив даних ELC охоплює період з 2017 до 2024 року, відповідно, як в DW дані наявні з 2015 по 2025 рік включно. Проте, як зазначено в звітах платформи Google Earth Engine (GEE), покриття знімками Sentinel-2 поверхні Землі за 2015-2016 роки мало недостатній рівень територіального охоплення, тому доцільним є використання класифікації, створеної на даних саме з 2017 року. Також варто відмітити, що DW дані LULC є інтегровані за весь рік по кожному з цих років, тобто враховуючи всі сезони. Тому найбільш доцільно використовувати такі дані за останній рік, який вже завершився повністю, тобто за 2024. Якщо використовувати дані класифікації, надані компанією ELC, вони мають вибірку знімків за певні числа або місяці і для створення інтегральної класифікації потребують додаткового моделювання.

За попередніми дослідженнями, джерела мають розбіжності в точності в залежності від регіону, проте в загальному позиціонуються як цілком придатні для досліджень. Точність знаходиться в межах 70% [11, 12]. Ще одним важливим аспектом у виборі джерела класифікації земельного покриття є візуальне порівняння класифікації з реальною ситуацією в тих містах, які були доступні як польові дані. Враховуючи вищезазначене, було прийнято рішення про використання саме даних класифікації DW на платформі GEE.

Dynamic World розроблений в результаті партнерства Google, Інституту світових ресурсів (WRI) та National Geographic Society на платформі Google Earth Engine (GEE) та платформи Google Cloud AI, на базі модифікованих даних Copernicus Sentinel (з 2015 року). Це новий автоматизований підхід для глобально узгодженої класифікації LULC з високою роздільною здатністю майже в режимі реального часу (NRT), з використанням глибокого навчання на 10-метрових знімках Sentinel-2 [13]. Класифікація DW базується на глибокій нейронній мережі (CNN), зокрема U-Net, адаптованій для обробки супутникових зображень Sentinel-2. Модель була навчена на понад 65 тисяч вручну розмічених полігонів, що представляють 9 класів земельного покриття [14]. Також за допомогою додаткової вибірки та експертного уточнення класів було проведено оцінку точності класифікації. За основу оцінки точності було обрано матрицю помилок DW та експертного консенсусу класифікації, який передбачає використання вибірки, де було або повне узгодження класів, або співпадіння хоча б у двох експертів. За цими розрахунками загальний відсоток точності склав 73.80% (рис. 1).

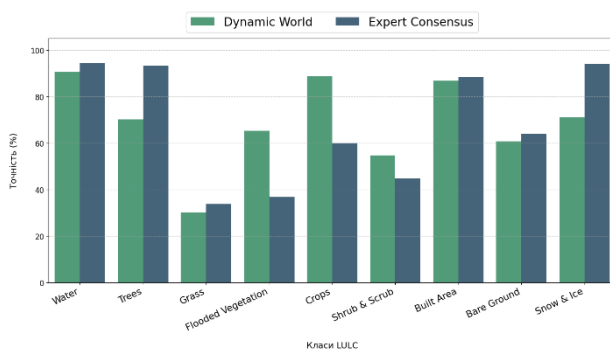


Рис. 1. Матриця помилок класифікації DW та експертного узгодження класів (загальний відсоток точності 73.80%)

Програмне забезпечення та просторові дані

Основні дані було отримано через платформу GEE, а саме два інтегрованих за кожен рік растрових набори класифікації LULC з роздільною здатністю 8 м за 2017 та 2024 рік відповідно. Відповідні растрові зображення згенеровані на основі знімків Sentinel-2 роздільною здатністю 10 м. Для проведення стратифікованої вибірки було отримано растрове зображення класифікації роздільною здатністю 50 м. Для розрахування зони завантаження растрових зображень було використано векторний шар території України, а також шари районів та громад. Всі набори інструментів, які були використані в дослідженні, включає в себе програмне забезпечення для обробки геопросторових даних QGIS версії 3.40.8.

Для проведення верифікації опорних даних використовувались космічні знімки високої роздільної здатності Google, Bing, Here, надані сервісами QuickMapServices, Google Earth Pro, зображення Google Maps Street View. Також на платформі Esri | Sentinel-2 Land Cover Explorer проводилось уточнення класів по знімках Sentinel-2 за відповідний рік [15].

Усі розрахунки та візуалізація матриць були виконані в програмному середовищі Python. Для аналізу точності класифікації та побудови матриць помилок і переходів було використано стандартну бібліотеку scikit-learn [16].

Методика обробки

Перший етап обробки включає отримання та підготовку растрових зображень LULC для аналізу. На другому етапі проводяться перевірки точності класифікації землекористування DW для території України. Третій етап – це посткласифікаційна статистична корекція площ (побудова матриці помилок). Заключний етап – це аналіз змін в землекористуванні та корекція результатів за допомогою довірчого інтервалу [17] та методу бутстреп [18].

На першому етапі було відібрано навчальні растри класифікації LULC від DW за 2017 та 2024 роки відповідно. Джерело DW надає готові інтегральні зображення з роздільною здатністю 10 метрів, з найпоширенішим класом пікселя за рік, а також з постобробкою, корекцією хмарності тощо. В результаті отримано шість растрових зображень і, оскільки наступні етапи передбачають роботу з загальним шаром на всю територію України, то окремі частини були об'єднані у вигляді віртуального шару Build Virtual Raster (VRT). Таким чином спрощуються процеси використання об'ємного растрового зображення.

На наступному етапі для проведення перевірки точності класифікації [19] було побудовано матрицю помилок на основі точок стратифікованої вибірки [20]. Вибірка була створена за допомогою інструментів random points in polygons та random selection within subsets із випадкових точок з фіксованою кількістю всередині полігонів заданого шару. Мінімальна відстань дорівнювала величині одного полігона/пікселя. Для поділу території на ділянки (страти) для вибірки було використано межі адміністративних районів України, з яких відбирались випадкові точки для верифікації. Таким чином було створено 4161 точку, які були дискретно порівну розподілені по класах класифікації за 2024 рік в межах кожного адміністративного району України. Під час контрольованої верифікації опорних точок вибірки було залишено 2168 найбільш релевантних точок, які отримали свій уточнений клас.

Кількість точок у кожному класі була встановлена з урахуванням необхідності забезпечення достатньої статистичної потужності для оцінки точності. Рівномірний розподіл точок за верифікованими класами (252-309 точок/клас) дозволив уникнути домінування класів з великою площею та забезпечив достатню кількість точок для аналізу менших, але важливих класів. За результатами верифікації було побудовано матриці помилок для оцінки точності класифікації DW. Зокрема, для початку було побудовано матрицю за 2024 рік. На візуалізації класифікація містить значні похибки, що виражаються у великих значеннях поза головною діагоналлю. Розраховані показники точності підтверджують низьку якість класифікації для території України. Загальна точність для 2024 року склала 51.15%, а коефіцієнт Каппа – 0.44.

Коефіцієнт Каппа [14] розраховується за формулою (1):

$$k = \frac{Po - Pe}{1 - Pe} \quad (1)$$

Хоча показники можуть бути дещо вищими, вони все ще вказують на суттєві помилки. Зважаючи на низьку точність класифікації, пряме порівняння площ класів 2017 з 2024 роком може призвести до значних похибок в оцінці реальних змін земного покриву. Тому для отримання достовірних результатів, пропонується використовувати більш надійний метод – корекцію площ на основі матриці переходів, яка враховує помилки класифікатора при ідентифікації саме змін, а не лише статичних класів.

Припустимо, що і для 2017 року точність класифікації буде теж низькою, тому що з кожним роком набір матеріалу для моделювання класифікації збільшується та покращується. Тому враховуючи мету дослідження як оцінку змін площ саме у відношенні зеленого покриву та сільськогосподарських угідь (crops), для оптимізації процесу верифікацію опорних даних для 2017 року було проведено частково. Таке рішення зумовлене специфікою змін в землекористуванні в Україні, де рекультивация, заліснення сільськогосподарських угідь проводиться нечасто і є зовсім незначним у порівнянні із зворотним переходом зелених зон в розорані ділянки. Точки, які були верифіковані як crops за 2024 рік, уточнені також за 2017 рік. Припускаючи, що built area, bare ground, water не зазнали суттєвих змін, які б вплинули на специфіку даного дослідження (не спостерігався перехід цих класів в crops при верифікації), для них класи верифікації були перенесені з даних 2024 року, як і для класів, які можна віднести до зон, вкритих рослинністю (trees, grass, flooded vegetation, shrub & scrub) [13]. Блок останніх між собою та із crops має найбільше помилок в класифікації. Тому для побудови матриці переходу блок вкритих рослинністю територій green zones (GZ) було визначено як окрему одиницю класифікації. Побудовано матриці переходів класифікації DW та верифікованих даних. Аналіз матриць переходів дозволив оцінити справжні зміни земного покриву та порівняти їх із результатами класифікації Dynamic World.

Матриця переходів верифікованих даних вважається еталоном, оскільки відображає істинні переходи, підтверджені ручною верифікацією. Більшість території в зв'язку з обмеженням вибірки пропонується вважати стабільною. Якщо DW "бачить" перехід, якого не існує або його роль незначна, така верифікація дозволяє це відкинути. Матриця переходів показує нулі для більшості переходів, що дозволяє уникнути помилкових оцінок DW і встановлювати їх площу як нульову. Ключова для цілей дослідження зміна – перехід із GZ в crops – зафіксована для 42 точок. Відсутність переходів у зворотному напрямку (з crops у GZ) та з інших класів (наприклад, water чи built area) є обмеженням даної вибірки, але узгоджується з нашим фокусом на виявленні саме цього типу змін. Такі обмеження можуть бути враховані в майбутніх дослідженнях із повною верифікацією даних за 2017 рік та покращенням точності DW чи інших наявних класифікацій на дану територію. Матриця переходів Dynamic World демонструє, що, попри попередню виявлену низьку точність класифікатора, найбільші значення переходів зафіксовані саме між класами crops та GZ. Це підтверджує наше припущення, що саме ці класи є найбільш динамічними на досліджуваній території.

Відносна стабільність класів built area, bare ground та water у класифікації DW також узгоджується з нашою гіпотезою, що основні зміни стосуються саме рослинного покриття.

За допомогою методу оцінки площі з урахуванням помилок класифікації (error-adjusted area estimation) [21] проведено неупереджене обчислення площ. Варто зазначити часткове використання методу через свідомо обраний шлях дослідження відношення лише певних класів між собою. Спершу для оцінки площі було обчислено коефіцієнт корекції для кожного переходу на основі матриць переходів, що співвідношення між кількістю переходів GZ - crops, які були верифіковані, та загальною кількістю таких переходів, які були ідентифіковані як такі класифікатором DW. Оскільки інші значення з матриці переходів верифікованих даних є нульовими, нас цікавить лише коефіцієнт GZ - crops.

Формула (2) коефіцієнта корекції:

$$C_{ij} = i/j, \quad (2)$$

де C_{ij} – коефіцієнт корекції, i – кількість точок переходу GZ - crops на основі верифікованих даних, j – кількість точок переходу GZ - crops на основі даних класифікації DW.

Коефіцієнт дорівнює 0,52. Для визначення еквіваленту переходів в площах було побудовано матрицю переходів, де ми беремо значення в пікселях (рис. 2).

Для кількісної оцінки невизначеності результатів було застосовано класичний довірчий інтервал (CI) та бутстреп-метод. Довірчий інтервал відображає можливий діапазон значень із заданим рівнем довіри, тоді як бутстреп дозволяє отримати більш гнучку оцінку без жорстких припущень щодо розподілу даних.



Рис. 2. Оцінка площ переходів на основі класифікації DW (в пікселях)

Для оцінки похибки частки переходів використовується формула (3):

$$SE(p) = \sqrt{(p(1-p))/n), \quad CI = p \pm z \cdot SE(p), \quad (3)$$

де: p – частка переходів у вибірці ($p = 42/2168 = 0,0194 \approx 2\%$), n – розмір вибірки (2168 точок), $SE(p)$ – стандартна похибка, z – квантиль нормального розподілу (для 95% інтервалу $z = 1.96$).

За вибіркою з 2168 точок ($p = 0,0194$) отримано оцінку площі переходів 9074 км² із межами інтервалу (6357; 11792 км²).

У випадках, коли спостережувані переходи містять багато нульових значень, класичний довірчий інтервал може недооцінювати рівень невизначеності. Тому доцільним є застосування бутстреп-методу, який менш залежний від припущення нормальності розподілу, оскільки базується на багаторазовому відтворенні вибірок із наявних даних. Це забезпечує ширший, але більш реалістичний інтервал і дозволяє врахувати навіть ті переходи, які у верифікованих даних відображалися як нульові.

Отримане середнє значення за бутстреп-оцінкою становить 9074 км², із довірчим інтервалом (6481; 11882), що можна розглядати як більш консервативну та надійну оцінку (рис. 3).

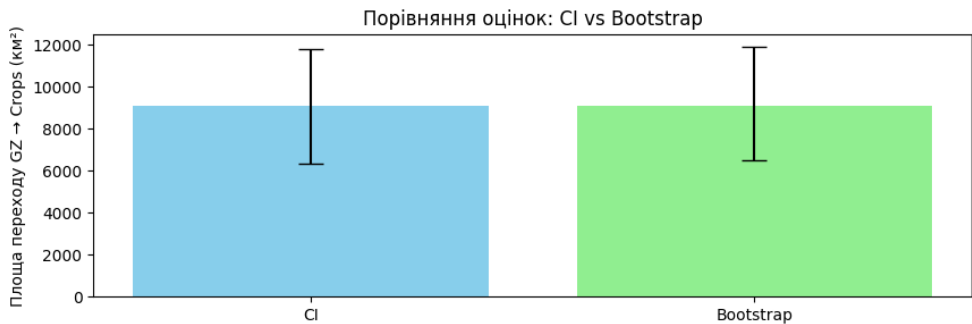


Рис. 3. Порівняння корекції площ за CI та CIboot

Для оцінки переходів від зон із природною рослинністю (GZ) до сільськогосподарських угідь (crops) застосовано три підходи. За коефіцієнтом корекції, отриманим на основі порівняння верифікованих даних і класифікації Dynamic World, площа переходів становить близько 9100 км² (910 тис. га). Використання класичного методу довірчого інтервалу (95% CI) дало оцінку 9074 км² з межами [6357; 11792 км²], що свідчить про значну невизначеність через обмеженість вибірки. Застосування бутстреп-методу дало подібний результат із середнім значенням 9181 км² та діапазоном [6481; 11882 км²]. Отримані широкі інтервали (понад 5 тис. км² різниці між нижньою та верхньою межею) відображають реальну статистичну невизначеність, зумовлену тим, що більшість можливих переходів у вибірці мали нульові значення, а основний внесок припав лише на один тип зміни (GZ → crops). Проте обґрунтовано можна припустити, що інші переходи мали б лише незначний внесок і їх врахування не збільшило б, а звузило б діапазон оцінок.

Таким чином, для подальшого аналізу використовувалося середнє значення (~9100 км²) як найбільш наближене до реального, водночас зазначаючи інтервал невизначеності. Це дозволяє поєднати наукову достовірність (через врахування CI та Bootstrap) із практичною інтерпретацією результатів. У майбутньому покращення точності класифікації та формування більш повної вибірки дозволить отримати точніші оцінки.

Висновки

Наявність класифікації землекористування по типу Dynamic World дає можливість оцінки динаміки землекористування. Це є важливим для моніторингу змін, які можуть негативно вплинути як на локальний мікроклімат, так і вносити вагомий внесок в парниковий баланс. Але навіть попри заявлену загальну точність класифікації 73%, використання таких класифікацій на регіональному рівні потребує додаткової оцінки точності та корекції. Точність була оцінена в 51% для 2024 року.

Збільшення площі сільськогосподарських угідь може негативно позначатися на мікрокліматі, запасах води в органіці тощо. За 7 років приріст до розораності 2017 року (33,5 млн га) становить 1,9%. Якщо врахувати весь довірчий діапазон, отримаємо від 1,9% до 3,6%. У відсотках до площі України маємо 56,57%–57,46%. Враховуючи, що на сьогодні дані про площі ріллі в Україні коливаються від 54% до 57%, можна стверджувати, що, спираючись на загальноприйняті показники викидів в 2-5 т/га/рік, через збільшення площі сільськогосподарських угідь на 6,400–11,700 км², потенційне збільшення викидів парникових газів може становити від 5.1 до 9.4 млн т CO₂ на рік.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. UNFCCC. (2024). Ukraine. National Inventory Report 2024. Retrieved from https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Ukraine_NIR_2024.pdf
2. Koryugin, A., & Lobunets, T. (2022). The land market as a tool for activating activities in the agricultural sector. *Economy and Society*, (39). (in Ukrainian). [Корюгін, А., & Лобунець, Т. (2022). Ринок землі як інструмент активізації діяльності в аграрній сфері. *Економіка та суспільство*, (39)]. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-39-46>
3. Shnaider, A. O. (2021). Problems of land reform implementation and the formation of the land market in Ukraine. *Bulletin of the NUWEE*, 1(15), 110–113. (in Ukrainian) [Шнайдер, А. О. (2021). Проблеми реалізації земельної реформи та становлення ринку землі в Україні. *Вісник НУВІП*, 1(15), 110–113].
4. Plisko, I., Bihun, O., Lebed, V., Nakisko, S., & Zalavskyi, Y. (2018). Creation of a national map of organic carbon stocks in the soils of Ukraine. *AgroChemistry and Soil Science*, 87, 57–62. <https://doi.org/10.31073/acss87-09>
5. Wedderburn-Bisshop, G. (2025). Increased transparency in accounting conventions could benefit climate policy. *Environmental Research Letters*, 20, 064001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adb7f2>
6. Kopittke, P. M., Dalal, R. C., McKenna, B. A., Smith, P., Wang, P., Weng, Z., van der Bom, F. J. T., & Menzies, N. W. (2024). Soil is a major contributor to global greenhouse gas emissions and climate change. *SOIL*, 10, 873–885. <https://doi.org/10.5194/soil-10-873-2024>
7. Spawn, S. A., Gibbs, H. K., & Lark, T. J. (2019). Carbon emissions from cropland expansion in the United States. *Environmental Research Letters*, 14(4), 045009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab0399>
8. Trofymenko, P., Lyashenko, V., Trofimenko, N., & Tymoshchuk, O. (2020). Modeling of the influence of land transformation of Ukraine on the formation of CO₂ emission and assimilation and the potential of reducing its concentration in the atmosphere. *Bioresources and environmental management*, 12, 42–54. <https://doi.org/10.31548/bio2020.01.005>
9. Okhariev, V. O., & Pidsadnii, S. H. (2024). Information support of decision making for technogenic and environmental safety using geospatial data analysis. *Environmental Safety and Natural Resources*, 50(2), 115–129. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.115-129>

10. Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathis, M., & Brumby, S. P. (2021). Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning. In *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 4704–4707). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499>
11. Hansen, M. C., Stehman, S. V., & Potapov, P. V. (2014). Quantification of global gross forest cover loss. *Remote Sensing of Environment*, 152, 167–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.020>
12. Çelik, D., & Altunel, A. (2025). Is Dynamic World a contender in global land-cover making race? A swift field assessment from Kastamonu, Türkiye. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 28, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2025.04.002>
13. Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., et al. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9, 251. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>
14. McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia Medica*, 22(3), 276–282. <https://hrcak.srce.hr/89395>
15. Esri. (2024). Sentinel-2 Land Cover Explorer. Retrieved from <https://livingatlas.arcgis.com/landcover/>
16. Scikit-learn developers. (2024). Scikit-learn: Machine Learning in Python. Retrieved from <https://scikit-learn.org/stable/>
17. Pek, J., Wong, A., & Wong, O. (2017). Confidence intervals for the mean of non-normal distribution: Transform or not to transform. *Open Journal of Statistics*, 7, 405–421. <https://doi.org/10.4236/ojs.2017.73029>
18. Efron, B. (1979). Bootstrap methods: Another look at the jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1), 1–26. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>
19. Chen, Z., & Zhao, S. (2022). Automatic monitoring of surface water dynamics using Sentinel-1 and Sentinel-2 data with Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 113, 103010. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103010>
20. Stehman, S. V. (2009). Sampling designs for accuracy assessment of land cover: The status of practice. *Remote Sensing of Environment*, 113(6), 1188–1209. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.021>
21. Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.015>

Стаття надійшла до редакції 10.07.2025 і прийнята до друку після рецензування 15.09.2025

The article was received 10.07.2025 and was accepted after revision 15.09.2025

Охарєв Вячеслав Александрович

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

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

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

Підсадній Сергій Григорович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

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

УДК 355.40;356.251

Vladyslav Vasylenko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

Taras Trysnyuk, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com

Yaroslav Berchun, PhD, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9373-2870> **e-mail:** berchun93@gmail.com

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

INFORMATION TECHNOLOGY FOR PASSIVE LOCATION OF DYNAMIC EVENTS IN THE BORDER ZONE

Abstract. *This article presents the results of a research project focused on developing an information technology for passive localization of dynamic events in the border areas of Chernihiv region, Ukraine – a territory continuously affected by artillery shelling and military activity due to ongoing armed aggression. The proposed system integrates multiple components: sensor-based measurement modules (seismic and acoustic detectors), digital catalogs of amplitude-frequency spectral patterns, geoinformation services, signal processing techniques, and predictive analytics. The research utilizes data from various sources – sensor networks, high-resolution satellite imagery, and open-source web platforms – all integrated into a multilayered system architecture powered by modern data processing tools.*

During the scientific research, the following results were obtained: the hardware and software complex of passive location was improved; digital catalogs of spectra of civil and military equipment were formed; GIS risk models were created for the border strip of Chernihiv region; modern forecasting methods were applied; a decision support system was developed; the possibilities of integrating the technology into the national early warning system were substantiated.

The outcome includes dynamic risk maps, thermal maps of forest burnouts and agricultural degradation, polygonal models of affected territories, and spatio-temporal diagrams of threat activity. Forecasting modules were implemented using statistical models such as ARIMA and Prophet, as well as deep learning models based on LSTM networks, allowing accurate prediction of repeated shelling or vehicle movement patterns. The practical relevance of this work lies in the possibility of integrating the developed technology into Ukraine's national early warning system. The system can be effectively used by local authorities, the State Emergency Service, and military units to monitor the security environment, ensure timely response, and minimize casualties and infrastructure damage in vulnerable border communities.

Keywords: *passive localization, geographic information systems, Chernihiv region, time series analysis, forecasting, monitoring.*

В.М. Василенко, Т.В. Триснюк, Я.О. Берчун

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

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПАСИВНОЇ ЛОКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ПОДІЙ У ПРИКОРДОННІЙ СМУЗІ

Анотація. У статті представлено результати науково-дослідної роботи, спрямованої на розробку інформаційної технології пасивної локації динамічних подій у прикордонних районах Чернігівської області, що зазнають постійних обстрілів та техногенного навантаження внаслідок воєнної агресії. Запропонована система інтегрує кілька компонентів: сенсорні вимірювальні модулі (сейсмічні та акустичні датчики), цифрові каталоги амплітудно-частотних характеристик подій, геоінформаційні сервіси, алгоритми обробки сигналів і прогнозу аналітику. У дослідженні використовуються дані з декількох джерел – сенсорних мереж, супутникових знімків високої роздільної здатності та відкритих веб-ресурсів, які інтегруються в багаторівневу архітектуру з використанням сучасних засобів обробки даних.

Результатом стало створення динамічних карт ризику, теплових карт вигорання лісів та деградації сільськогосподарських угідь, полігональних моделей пошкоджених територій та просторово-часових графіків активності загроз. Також реалізовано модулі прогнозування з використанням статистичних моделей ARIMA та Prophet, а також глибинного навчання на базі рекурентних LSTM-мереж, що забезпечують точне передбачення повторних обстрілів або переміщень техніки. Практична значущість роботи полягає в можливості інтеграції розробленої технології у національну систему раннього оповіщення України. Вона може бути використана органами місцевого самоврядування, підрозділами ДСНС та військовими структурами для моніторингу обстановки, своєчасного реагування та мінімізації втрат серед населення прикордонних територій.

Ключові слова: пасивна локація, геоінформаційні системи, Чернігівська область, аналіз часових рядів, прогнозування, моніторинг.

[https:// doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.97-107](https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.97-107)

Вступ

З початку широкомасштабної збройної агресії проти України територія Чернігівської області стала ареною активних бойових дій. У перші місяці війни на прикордонних напрямках відбулося значне зосередження артилерійських систем, бронетехніки та іншої військової техніки. Наслідком стали масові обстріли населених пунктів, руйнування об'єктів критичної інфраструктури, пошкодження транспортної мережі, житлових кварталів та соціальних установ. Це створило передумови для гострої потреби у створенні науково обґрунтованих технологій моніторингу та систем раннього оповіщення, здатних виявляти динамічні події у прикордонній смузі.

Проблематика пасивної локації особливо актуальна у воєнних умовах, коли використання активних систем спостереження може становити додатковий ризик. Пасивні методи ґрунтуються на реєстрації акустичних, сейсмічних або електромагнітних коливань, що виникають унаслідок руху військової техніки,

вибухів або артилерійських пострілів. Це дозволяє здійснювати ідентифікацію загроз без випромінювання сигналів і, відповідно, без викриття позицій системи моніторингу.

Актуальність дослідження обумовлена зростанням загроз для цивільного населення та інфраструктури прикордонних регіонів України внаслідок збройної агресії. Чернігівська область із 2022 року систематично зазнає артилерійських і мінометних обстрілів, що спричиняє не лише людські втрати, а й екологічні наслідки, зокрема пожежі, деградацію сільськогосподарських угідь і руйнування лісових масивів [1–3]. Традиційні методи моніторингу є недостатніми для оперативного аналізу, а наявні системи раннього оповіщення потребують розширення функціоналу. Міжнародний досвід (Copernicus EMS, UN-SPIDER, NATO, FEMA) показує ефективність інтеграції ГІС, дистанційного зондування та сенсорних систем у кризовому управлінні [8–11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні наукові розробки у сфері моніторингу надзвичайних ситуацій демонструють високий потенціал пасивних сенсорних мереж для виявлення обстрілів, руху техніки та інших аномальних подій. Зокрема, у [4–7] розглядається використання розподілених акустичних сенсорів для моніторингу вибухів і пересування бронетехніки. У дослідженнях [8–11] показано ефективність інтеграції супутникових даних, ГІС-аналітики та алгоритмів обробки великих обсягів даних для формування систем ситуаційної обізнаності в режимі реального часу. Проте більшість рішень зосереджені на постфактум аналізі або мають високу вартість розгортання в умовах бойових дій.

Метою роботи є розроблення засобів та інструментів системи раннього оповіщення про активність ворога в приграничній смузі та підтримка прийняття рішень щодо визначення локації потенційної загрози як елемента сейсмічної розвідки.

Об'єктом дослідження є пасивний моніторинг динамічних подій у прикордонній смузі на основі акустичних та сейсмічних сигналів, спричинених бойовими діями.

Виклад основного матеріалу дослідження

Наукові дослідження спрямовані на вдосконалення апаратно-програмного комплексу пасивної локації. На знімках території Чернігівської області чітко простежуються наслідки артилерійських і ракетних ударів: зруйновані житлові квартали, пошкоджені промислові об'єкти, вигорання лісових масивів і полів. Просторовий аналіз супутникових зображень дає змогу визначати масштаби руйнувань, відстежувати динаміку змін у часі та локалізувати найнебезпечніші ділянки.

Важливим є поєднання цих знімків із даними сейсмоакустичного моніторингу. Наприклад, кожен вибух або пересування колони техніки залишає специфічний спектральний відбиток, який може бути зареєстрований спеціалізованими датчиками. У поєднанні з супутниковими картами ці дані дозволяють не лише зафіксувати сам факт події, а й визначити її характер: рух цивільного транспорту, роботу сільськогосподарської техніки чи пересування бойових машин.

Такий підхід формує підґрунтя для побудови комплексної інформаційної технології пасивної локації, здатної інтегрувати багатоканальні дані в єдиному аналітичному середовищі.

Система включає сейсмічні та акустичні сенсори, блок збору даних, промисловий комп'ютер, модулі попередньої обробки й передачі у хмарне середовище, інтеграцію у геоінформаційну систему [4–7]. Це дозволило підвищити достовірність і швидкість фіксації динамічних подій. Значну увагу приділено створенню цифрових каталогів амплітудно-частотних спектрів. Для цивільної техніки (трактори, комбайни, транспортні засоби) сформовано окрему базу даних, яка дозволяє відрізнити господарську активність від військових загроз. Для військової техніки (танки, САУ, міномети) створено базу характерних спектрів, що забезпечує автоматизовану ідентифікацію та зменшення кількості хибних сигналів. Важливим результатом є побудова ГІС-моделі прикордонної смуги Чернігівської області. У моделі поєднано сенсорні вимірювання, супутникові знімки та відкриті інтернет-дані. Побудовано карти ризику, що відображають зони високої, середньої та низької небезпеки. Аналіз відкритих джерел інформації є важливим інструментом у дослідженнях воєнної обстановки, особливо для прикордонних регіонів, які систематично зазнають вогневого впливу противника. Для Чернігівської області, що межує з російською федерацією та республікою білорусь, такі джерела формують основу для створення цифрової геопросторової бази даних обстрілів і прогнозування майбутніх загроз. Вони охоплюють широкий спектр інформаційних ресурсів: від супутникових знімків міжнародних компаній до інтерактивних карт громадських ініціатив і повідомлень офіційних державних органів.

Особливе значення мають супутникові знімки високої роздільної здатності, що дозволяють фіксувати не лише масштабні руйнування, але й локальні наслідки атак – пошкодження окремих будівель, вирви від артилерійських снарядів або згорілі сільськогосподарські поля. Використання мультиспектральних сенсорів робить можливим виявлення теплових аномалій, характерних для пожеж, що супроводжують обстріли, або для нових місць розміщення техніки. Прикладом є регулярна фіксація масштабних пожеж у лісових масивах Чернігівського та Новгород-Сіверського районів, які виникали внаслідок ракетно-артилерійських ударів.

Період із лютого 2022 року по 2025 рік став для Чернігівської області надзвичайно складним з точки зору безпеки, адже регіон постійно перебуває під загрозою артилерійських і мінометних обстрілів, авіаційних ударів та диверсійних дій противника. Аналіз динаміки атак на прикордонні дозволяє простежити еволюцію воєнної активності та сформувати базу для прогнозування майбутніх загроз. Карта області показує, що найбільша інтенсивність атак спостерігалась у прикордонних громадах – Семенівській, Городнянській та Новгород-Сіверській, а також у районі обласного центру. Найбільш інтенсивна фаза обстрілів припала на перші місяці повномасштабної агресії, коли місто Чернігів опинилося в умовах фактичної блокади. У цей період масовані удари наносилися як по цивільній інфраструктурі, так і по об'єктах оборонного значення. Протягом березня 2022 року було зафіксовано сотні випадків артилерійських і авіаційних атак, унаслідок яких місто зазнало серйозних руйнувань. Після відходу противника від обласного центру активність обстрілів зменшилася, однак вони зосередилися на прикордонних районах.

Упродовж 2023 року відбувся перехід від хаотичних ударів до систематичних обстрілів сіл і містечок, розташованих безпосередньо біля державного кордону. Найбільше страждали громади Семенівська, Новгород-Сіверська та Городнянська. За даними відкритих джерел, лише протягом весни 2023 року у прикордонні було зафіксовано понад 700 випадків обстрілів різного типу. Це свідчить про цілеспрямовану тактику виснаження населення прикордонних територій та створення перманентної зони небезпеки.

У 2024 році кількість атак залишалася стабільно високою, але з'явилися нові тенденції. Противник почав активно застосовувати змішану тактику: поєднання артилерійських ударів із використанням безпілотних літальних апаратів для коригування вогню. Це призвело до збільшення точності обстрілів і до зростання кількості жертв серед цивільного населення. Крім того, у 2024 році було зафіксовано збільшення інтенсивності обстрілів транспортної інфраструктури: залізничних станцій, мостів, ділянок автошляхів. На початку 2025 року динаміка атак демонструє збереження високого рівня загрози. Систематичні обстріли прикордонних громад стали буденністю: лише протягом одного тижня лютого 2025 року у регіоні було зафіксовано майже 200 атак різного масштабу. Така частота свідчить про прагнення противника підтримувати постійну напругу, обмежувати можливості розвитку регіону та деморалізувати місцеве населення.

Застосування методів просторово-часового аналізу дозволяє визначити певні закономірності у динаміці атак. По-перше, вони мають виражену хвильову структуру: періоди високої інтенсивності змінюються відносним затишшям, але загальна тенденція залишається стабільно високою (рис. 1).

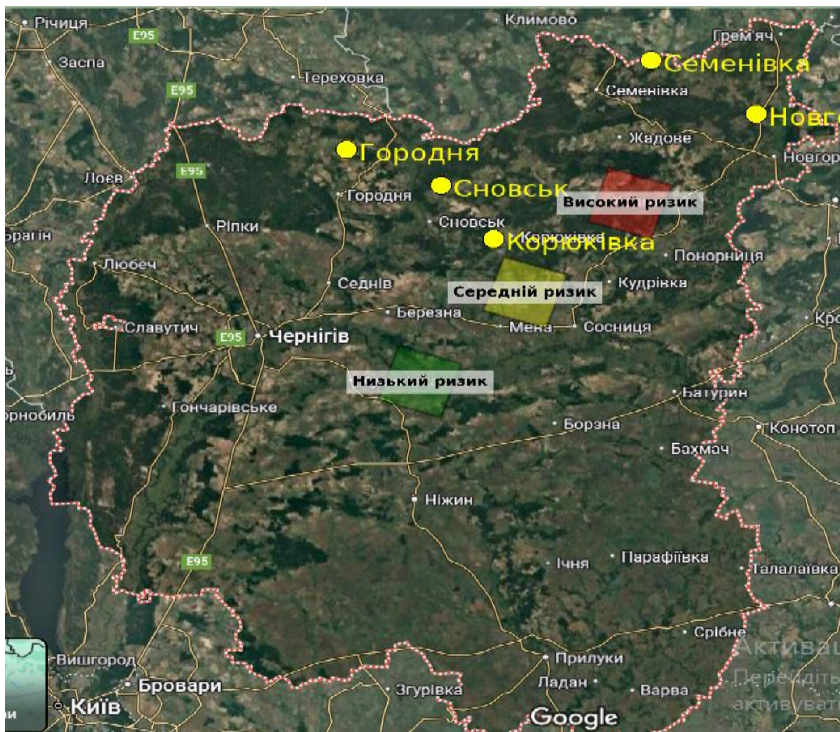


Рис. 1. Карта Чернігівської області з прикордонною смугою та основними точками атак

По-друге, простежується залежність між зростанням атак і певними політичними чи військовими подіями – проведенням переговорів, початком ротації військових частин, активізацією боїв на інших напрямках. По-третє, характер атак змінюється у залежності від пори року: взимку зростає кількість артилерійських обстрілів, тоді як у літній сезон активніше застосовуються безпілотники та тактика підпалів лісів і полів.

Теплові карти вигорання та полігональні моделі уражених територій забезпечили можливість кількісного аналізу площ пошкоджень [12–14]. Аналіз індексів рослинності (NDVI) і коефіцієнтів вигорання (NBR) дозволяє картографувати пошкоджені ділянки лісів і полів, що характерно для прикордонної смуги Чернігівщини (рис. 2).

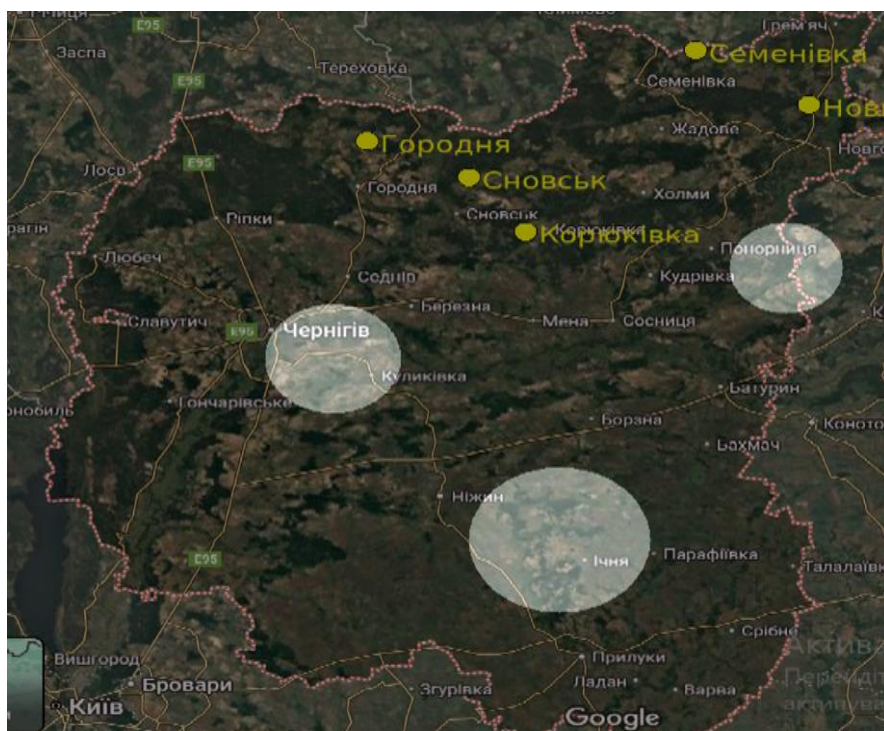


Рис. 2. Теплова карта вигорання лісових і польових територій

Розробка інформаційної технології пасивної локації динамічних подій у прикордонній смузі ґрунтується на інтегрованому підході, який поєднує методи збору даних, алгоритми їх обробки та засоби геоінформаційної візуалізації. На відміну від активних систем радіолокації чи оптико-електронного спостереження, пасивні технології не випромінюють власного сигналу, що забезпечує прихованість роботи та безпеку у воєнних умовах. На основі часових рядів обстрілів у Семенівській, Сновській та Новгород-Сіверській громадах розроблено прогностичні моделі з використанням ARIMA, Prophet і LSTM-мереж [13, 18]. Це дозволило передбачати тенденції обстрілів на горизонті 7–14 днів. Верифікація результатів показала високу відповідність між прогностичними та фактичними даними.

Рис. 3 (радарна діаграма) узагальнює дані у вигляді багатовимірної візуалізації. Такий формат зручний для інтегрованого аналізу, адже дозволяє побачити баланс сильних і слабких сторін кожного підходу в комплексі. Полігональні зони мають більш «врівноважений» профіль, тоді як теплові карти демонструють пікові значення лише за критеріями швидкості та наочності.

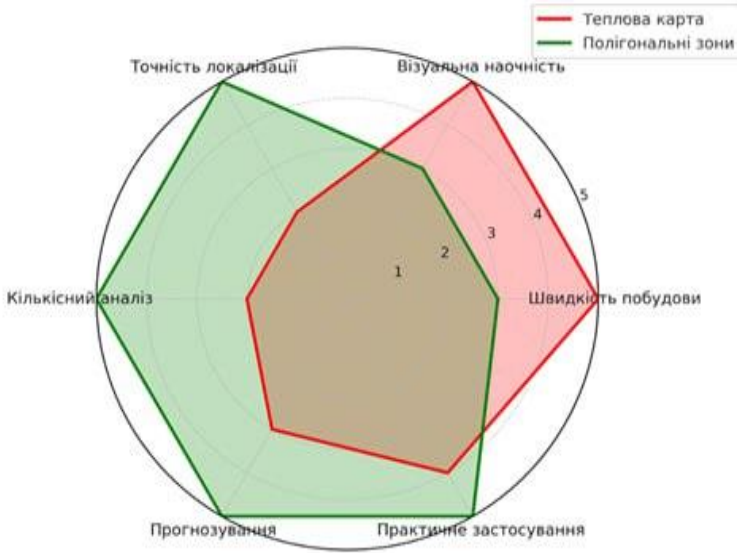


Рис. 3. Радарна діаграма порівняння методів візуалізації (теплові карти та полігональні зони)

Таким чином, обидва методи мають свою специфічну нішу. Теплові карти забезпечують швидке виявлення «гарячих точок» і загальну візуалізацію тенденцій, але поступаються полігональним зонам у точності та можливостях кількісного аналізу. Полігональні карти, навпаки, дозволяють отримати детальні дані, що мають прикладне значення для практичних рішень, однак вимагають більшого часу для дешифрування знімків.

Суттєвою складовою є створення системи підтримки прийняття рішень, орієнтованої на органи місцевої влади, ДСНС та військові структури. Система використовує матриці рішень, сценарний аналіз і картографічну візуалізацію для оперативного реагування. Теплові карти дозволяють наочно представити просторовий розподіл вогневого впливу та його інтенсивність. Для прикладу, теплове моделювання даних у Семенівській громаді показало чітку концентрацію «гарячих точок» вздовж північної прикордонної смуги. У період із травня по жовтень 2023 року у цій зоні теплові карти зафіксували значно вищу щільність пожеж у порівнянні з центральними районами громади, що підтвердило дані супутникових знімків Sentinel-2. У Сновській громаді аналогічний підхід дав змогу виявити періодичні спалахи вигорання біля залізничних вузлів, що вказує на прицільні обстріли транспортної інфраструктури. Таблиця 1 дозволяє коротко порівняти оперативність і точність методів, показуючи, що теплові карти є більш придатними для швидкого реагування, а полігональні – для детального аналізу й управлінських рішень.

Головною перевагою теплових карт є оперативність аналізу: достатньо базового набору даних (координати й час подій), щоб отримати візуальне уявлення про масштаби проблеми. Теплова карта є також ефективним інструментом для інформування органів державної влади, міжнародних партнерів чи місцевого населення, оскільки вона інтуїтивно зрозуміла навіть без спеціальної підготовки. Водночас слабким місцем теплового підходу є його умовність: межі зон не мають чіткої просторової фіксації, що ускладнює застосування даних для розрахунків площ або планування конкретних заходів із ліквідації наслідків. Для узагальнення результатів проведено порівняння теплових карт і полігональних зон.

Таблиця 1. Порівняння характеристик теплових карт і полігональних зон для візуалізації вигорання територій (2022-2024 рр.)

Критерій	Теплова карта	Полігональні зони
Швидкість побудови	Дуже висока, достатньо мінімального набору даних (координати + час).	Потребує додаткової дешифрації супутникових знімків та верифікації меж.
Візуальна наочність	Інтуїтивно зрозуміла, чітко виділяє «гарячі точки».	Менш ефектна для огляду, але надає точні просторові межі.
Точність просторової локалізації	Низька: межі зон умовні, орієнтовні.	Висока: зони мають чіткі полігональні контури.
Можливість кількісного аналізу	Обмежена: складно визначати площі чи проводити геостатистичні обчислення.	Повна: можна обчислювати площі, відсотки покриття, інтегрувати в ГІС-аналіз.
Придатність для прогнозування	Підходить для загальної оцінки тенденцій і визначення концентрацій.	Підходить для сценарного прогнозування і побудови моделей ризику.
Застосування у практиці	Використовується для швидких звітів, презентацій, ситуаційного аналізу.	Застосовується для стратегічного планування, рекультивації, оцінки збитків.
Приклад у Чернігівській області	У Семенівській громаді тепла карта показала три «гарячі зони» у 2023 р.	У Новгород-Сіверській громаді полігони дозволили оцінити понад 250 га вигорання.

Архітектурна модель геоінформаційної системи (ГІС) для моніторингу прикордонних територій Чернігівської області базується на принципі багаторівневої організації даних та модульної побудови програмного комплексу. Такий підхід забезпечує масштабованість, надійність і можливість гнучкої адаптації до динамічних умов воєнного часу. Архітектура включає кілька взаємопов'язаних рівнів:

1. Рівень збору даних. На цьому рівні відбувається первинна реєстрація подій за допомогою сенсорів, супутників і OSINT-ресурсів.
2. Рівень попередньої обробки. Дані з різних джерел синхронізуються у часі та приводяться до єдиного формату.
3. Рівень зберігання даних. Центральним ядром є база геопросторових даних (PostgreSQL + PostGIS). Тут кожна подія має атрибутивний опис.

4. Аналітичний рівень. Цей рівень реалізує просторово-часовий аналіз, кластеризацію та прогнозування.
5. Рівень візуалізації. Результати аналізу відображаються у вигляді карт і графіків.
6. Рівень оповіщення. Заключним елементом є система раннього попередження. Вона формує автоматичні повідомлення для органів влади та цивільного населення у разі високої ймовірності повторного обстрілу.

Розробка геоінформаційної системи для прикордонних територій Чернігівської області має не лише наукове, але й безпосереднє прикладне значення. На відміну від класичних картографічних чи статистичних інструментів, ГІС у даному випадку розглядається як інтегрована аналітична платформа, здатна підтримувати процес прийняття рішень у режимі, наближеному до реального часу. Її прикладна роль полягає у тому, щоб забезпечити оперативний моніторинг, формування карт ризику, прогнозування повторних атак, а також інтеграцію в систему раннього оповіщення населення та органів влади.

Висновки

У ході виконання наукового дослідження отримано такі результати: вдосконалено апаратно-програмний комплекс пасивної локації; сформовано цифрові каталоги спектрів цивільної та військової техніки; створено ГІС-моделі ризиків для прикордонної смуги Чернігівщини; застосовано сучасні методи прогнозування; розроблено систему підтримки прийняття рішень; обґрунтовано можливості інтеграції технології у національну систему раннього оповіщення. Робота має практичну значимість для захисту населення та інфраструктури прикордонних громад і може бути масштабована для інших регіонів України та інтегрована у міжнародні системи моніторингу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang Y., Li X. GIS-based spatio-temporal risk modeling for conflict-affected regions. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14(11), pp. 2211–2225.
2. Трофимчук О.М. Технології просторового аналізу для управління ризиками в умовах воєнних дій. *Вісник НАН України*, 2022, №7, с. 23–34.
3. UN-SPIDER: United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.un-spider.org/>
4. Хавкін, О.К., Калюх, Ю.І., Мар'єнков, М.Г., Глуховський, В.П., Приємський, В.Д. (2008). Моніторинг будівельних конструкцій і застосування нових державних норм ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України». *Будівельні конструкції: Зб. наук. праць*, 69, 26-44.
5. Василенко В., Охарєв В., Триснюк Т., Ющенко К. Цифровізація процесів управління персоналом для повоєнного відновлення України. Екологічна безпека та природокористування, Київський нац. ун-т будівництва та архітектури, 2025, вип. 54(2), с. 136–142. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.136-142>
6. Триснюк В.М., Марущак В.М. Інформаційні технології для візуалізації та обробки даних у сфері геопросторової розвідки. Телекомунікаційні та інформаційні технології, ДУІКТ, 2024, №4(85), с. 113–118. ISSN 2412-4338. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.044726>

7. Smith J., Anderson R. Machine learning for time-series forecasting of dynamic events. *Journal of Geoinformatics*, 2021, vol. 8(2), pp. 77–89.
8. Marienkov, M., Kaliukh, I., Trofymchuk, O. (2024). The digital twin use for modeling the multi-storey building response to seismic impacts. *Structural Concrete*, 25, (3), 2079–2096. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.202300695>
9. Трофимчук О.М., Петренко С.В. Еколого-геоінформаційні системи та їх застосування у моніторингу небезпечних процесів. Київ: Академперіодика, 2023. – 298 с.
10. Copernicus Emergency Management Service. European Commission [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://emergency.copernicus.eu/>
11. Horner C., Miller D. Deep learning for battlefield event detection. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, vol. 61, pp. 520–534.
12. Liu H., Wang Z. Integration of satellite data and GIS for early-warning systems. *Int. J. of Applied Earth Observation*, 2020, vol. 91, pp. 102–113.
13. Petrov P., Ivanov D. Passive localization technologies in modern border security systems. *European Security Review*, 2021, №9, pp. 112–123.
14. Borrelli P., Panagos P. Mapping fire-induced land degradation using remote sensing. *Land Degradation & Development*, 2021, vol. 32(15), pp. 4337–4349.

Стаття надійшла до редакції 23.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 26.08.2025

REFERENCES

1. Zhang, Y., & Li, X. (2022). GIS-based spatio-temporal risk modeling for conflict-affected regions. *Remote Sensing*, 14(11), 2211–2225.
2. Trofymchuk, O.M. (2022). Spatial analysis technologies for risk management in wartime conditions. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 7, 23–34 [in Ukrainian].
3. UN-SPIDER: United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response. Retrieved from <https://www.un-spider.org>
4. Khavkin, O.K., Kalyukh, Y.I., Mar'enkov, M.G., Glukhovsky, V.P., & Priemsky, V.D. (2008). Monitoring of building structures and application of new state standards DBN V.1.1-12:2006 “Construction in seismic areas of Ukraine”. *Building structures: Collection of scientific works*, 69, 26–44 [in Ukrainian].
5. Vasylenko, V., Okharev, V., Trysniuk, T., & Yushchenko, K. (2025). Digitalization of human resource management processes for Ukraine’s post-war recovery. *Environmental Safety and Natural Resources*, 54(2), 136–142. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.136-142> [in Ukrainian].
6. Trysniuk, V.M., & Marushchak, V.M. (2024). Information technologies for visualization and data processing in geospatial intelligence. *Journal of Telecommunication and Information Technologies*, State University of Telecommunications, 4(85), 113–118. ISSN 2412-4338. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.044726> [in Ukrainian].
7. Smith, J., & Anderson, R. (2021). Machine learning for time-series forecasting of dynamic events. *Journal of Geoinformatics*, 8(2), 77–89.
8. Marienkov, M., Kaliukh, I., & Trofymchuk, O. (2024). The digital twin use for modeling the multi-storey building response to seismic impacts. *Structural Concrete*, 25, (3), 2079–2096. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.202300695>
9. Trofymchuk, O.M., & Petrenko, S.V. (2023). Ecological-geoinformation systems and their application in monitoring of hazardous processes. Kyiv: Akademperiodyka [in Ukrainian].
10. Copernicus Emergency Management Service, European Commission. Retrieved from <https://emergency.copernicus.eu>
11. Horner, C., & Miller, D. (2023). Deep learning for battlefield event detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 520–534.

12. Liu, H., & Wang, Z. (2020). Integration of satellite data and GIS for early-warning systems. *International Journal of Applied Earth Observation*, 91, 102–113.
13. Petrov, P., & Ivanov, D. (2021). Passive localization technologies in modern border security systems. *European Security Review*, 9, 112–123.
14. Borrelli, P., & Panagos, P. (2021). Mapping fire-induced land degradation using remote sensing. *Land Degradation & Development*, 32(15), 4337–4349.

The article was received 23.06.2025 and was accepted after revision 26.08.2025

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

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

Берчун Ярослав Олександрович

PhD, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9373-2870> **e-mail:** berchun93@gmail.com

УДК 621.396:004.89

Anton Kostyuk¹, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3107-9976> **e-mail:** 1999kostyukanton@gmail.com

Serhiy Zaitsev¹, doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information and Computer Systems

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6643-917X> **e-mail:** Serza1979@gmail.com

Vladyslav Vasylenko², candidate of Technical Sciences, acting head of Department of Information and Communication Technologies

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

Lilia Zaitseva², postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0668-711X> **e-mail:** lili5990n@ukr.net

¹National University «Chernihiv Polytechnic», Chernihiv, Ukraine

²Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

UX RESEARCH METHODS AND STRATEGIES IN THE DEVELOPMENT OF INTERACTIVE INTERFACES

Abstract. *This article reviews current methodologies and algorithms used in UX research for user interface design, leveraging technological advances.*

UX research is essential in digital product design, although its approach varies depending on whether the product is new or established. For new products, research primarily involves beta testing to identify critical issues before launch. In contrast, research on existing products focuses on implementing and evaluating improvements to improve the user experience.

This article explores a number of UX research methods and algorithmic approaches used in the design of interactive interfaces, with a particular emphasis on understanding user goals, preferences, behaviors, and needs. An information system designed to store and process data served as a case study for practical evaluation.

The study involved real users performing specific tasks, such as completing purchase transactions and registration forms. These actions illustrated how well-executed UX research can lead to significant long-term savings in time and resources. According to Forrester Research, improving user experience can increase conversion rates by up to 400%, effectively doubling initial performance metrics. Early detection of design flaws during the development phase also helps minimize future project costs.

Overall, the study offers a comprehensive overview of methodologies and algorithms that improve the quality and effectiveness of UX research in the design of interactive systems. It highlights the critical role of user-centered design in creating intuitive graphical user interfaces (GUIs) and other software applications that meet user expectations and facilitate seamless interactions.

Keywords: *interactive interfaces, UX research, GUI, database user interfaces.*

А.Ю. Костюк¹, С.В. Зайцев¹, В.М. Василенко², Л.І. Зайцева²

¹Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, Україна

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, м. Київ, Україна

МЕТОДИ ТА СТРАТЕГІЇ UX-ДОСЛІДЖЕННЯ В РОЗРОБЦІ ІНТЕРАКТИВНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

Анотація. У статті розглядаються сучасні методології та алгоритми, що застосовуються в UX-дослідженні для розробки користувацького інтерфейсу, з використанням технологічних досягнень.

UX-дослідження є важливим у дизайні цифрових продуктів, хоча його підхід залежить від того, чи є продукт новим, чи вже відомий. Для нових продуктів дослідження в першу чергу включає бета-тестування для виявлення критичних проблем перед запуском. На противагу цьому, дослідження існуючих продуктів зосереджені на впровадженні та оцінці покращень для поліпшення користувацького досвіду.

У цій статті досліджується ряд методів UX-дослідження та алгоритмічних підходів, що використовуються в розробці інтерактивних інтерфейсів, з особливим акцентом на розумінні цілей, уподобань, поведінки та потреб користувачів. Інформаційна система, розроблена для зберігання та обробки даних, слугувала тематичним дослідженням для практичної оцінки.

У дослідженні брали участь реальні користувачі, які виконували певні завдання, такі як завершення транзакцій покупок та реєстраційних форм. Ці дії проілюстрували, як добре виконане UX-дослідження може призвести до суттєвої довгострокової економії часу та ресурсів. За даними Forrester Research, покращення користувацького досвіду може збільшити коефіцієнти конверсії до 400%, фактично подвоївши початкові показники ефективності. Раннє виявлення недоліків дизайну на етапі розробки також сприяє мінімізації майбутніх витрат на проєкт.

Загалом, дослідження пропонує вичерпний огляд методологій та алгоритмів, які покращують якість та ефективність досліджень UX у проєктуванні інтерактивних систем. Воно підкреслює критичну роль орієнтованого на користувача дизайну у створенні інтуїтивно зрозумілих графічних інтерфейсів користувача (GUI) та інших програмних застосунків, що відповідають очікуванням користувачів та сприяють безперебійній взаємодії.

Ключові слова: інтерактивні інтерфейси, UX-дослідження, графічний інтерфейс користувача, користувацькі інтерфейси до баз даних.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.108-115>

Вступ

У сучасному світі дизайн відіграє життєво важливу та невіддільну роль у повсякденному житті людини. Щоб по-справжньому зрозуміти суть користувацького досвіду (UX), спочатку необхідно розширити тлумачення того, що охоплює «дизайн».

У сучасному конкурентному середовищі високоякісний дизайн є обов'язковим – це критично важливий компонент у встановленні ринкової переваги. Більше того, його вплив на повсякденне життя людей неможливо переоцінити. Сьогодні дизайн – це вже не просто засіб естетичного вираження

матеріальних та культурних цінностей; він став невід'ємною частиною соціального управління та впливу. Він формує сприйняття світу, зберігає традиції, сприяє інноваціям, підвищує комфорт та збагачує людський досвід, роблячи життя більш мирним та яскравим.

Фірмовий стиль має багатогранну структуру та широку сферу впливу. Як правило, добре розроблений фірмовий стиль виконує дві основні функції.

Значимість цього дослідження полягає в його зосередженості на вивченні методів та алгоритмів, що використовуються в UX-дослідженнях для створення інтерактивних користувацьких інтерфейсів. Проведення ретельного та ефективного UX-дослідження є важливим для розробки цифрових середовищ, які є одночасно інтуїтивно зрозумілими та зручними для користувача. Хоча більшість сучасних інтерфейсів значною мірою покладаються на графічні елементи з обмеженими можливостями взаємодії, інтерактивні інтерфейси виходять за рамки цього, включаючи додаткові режими комунікації, такі як голосове введення, візуальні підказки та тактильні реакції – функції, що відображають природне людське спілкування. Дизайнери повинні ретельно вибирати найефективніші канали для доставки різних типів інформації, залежно від контексту та потреб користувача.

Головною метою цього дослідження є аналіз та оцінка різних методологій та алгоритмів UX-дослідження для покращення процесу проектування та функціональності інтерактивних інтерфейсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Nielsen Norman Group окреслює структуровану систему аналізу продукту, яка складається з семи основних етапів. До них належать встановлення чітких цілей вимірювання, вибір відповідних методів оцінки, збір базових даних, удосконалення дизайну продукту, проведення вимірювань після коригування, аналіз результатів та, за необхідності, оцінка рентабельності інвестицій (ROI) [1].

Важливо зазначити, що заключний етап повинен плавно переходити назад до четвертого етапу, щоб забезпечити безперервну оцінку встановлених показників. Глибоке розуміння цього процесу вимагає поглибленого аналізу кожного етапу окремо.

Вирішальним аспектом UX-дослідження є мета створення добре структурованого користувацького досвіду, оскільки він відіграє фундаментальну роль в успішному впровадженні програмного продукту.

Мета роботи. Метою статті є розробка та впровадження інформаційної системи для зберігання та обробки даних з одночасним інтегруванням UX-досліджень для покращення ефективності проектування інтерактивних інтерфейсів.

Об'єктом дослідження є процес UX-дослідження розробленої інформаційної системи для зберігання та обробки даних.

Виклад основного матеріалу дослідження

Сучасні методи UX-досліджень побудовані на шкалі зручності використання системи (SUS). Це широко застосовуваний метод оцінки зручності використання продукту за допомогою стандартизованого опитування, де користувачі відповідають на 10 тверджень за 5-бальною шкалою Лікерта (1 – повна незгода, 5 – повна згода). Для розрахунку загального балу зручності використання відповіді обробляються за заздалегідь визначеною формулою:

для тверджень з непарними номерами 1 віднімається від оцінки користувача, тоді як для тверджень з парними номерами оцінка віднімається від 5. Загальна сума потім множиться на 2,5, отримуючи бал від 0 до 100 із середнім орієнтиром 68. Остаточний бал розраховується за такою формулою:

$$SUS = (Q1+Q3+Q5+Q7+Q9-Q2-Q4-Q6-Q8-Q10+20)*2.5, \quad (1)$$

де QN – це результат відповіді на N-те запитання за п'ятибальною шкалою.

Оцінка задоволеності клієнтів (CSAT) – це показник, який відображає задоволеність клієнтів на основі їхньої емоційної реакції. Цей показник зазвичай розраховується за допомогою шкали оцінювання, де кінцеве значення виражається у відсотках. Формула для розрахунку така

$$NPS = C/Q*100\%, \quad (2)$$

де С – кількість клієнтів, задоволених продуктом (які поставили йому оцінку 4 або 5), Q – загальна кількість проведених опитувань.

Ті, хто має оцінки від 7 до 8, є «нейтральними». Але «критики» дають оцінку не вище 6. Для розрахунку значення прийнято використовувати формулу:

$$CSAT=((Qp-Qc)/Qr)*100\%, \quad (3)$$

де Qp – загальна кількість «промоутерів», Qc – загальна кількість «критиків», Qr – загальна кількість усіх учасників опитування.

Підсумковий бал може коливатися від -100% до 100%. Цей показник зазвичай використовується як альтернатива шкалі зручності.

Методологія включає 4 питання про простоту продукту та особливості функціоналу. Якщо методологія UMUX / UMUX-Lite (Usability Metrics for User Experience) використовує 7-бальну шкалу, кінцеве значення можна розрахувати за формулою:

$$UMUX = (Q1+Q3-Q2-Q4+12)/24*100\%, \quad (4)$$

де QN – це результат відповіді на N-те питання за семибальною шкалою.

Єдиний показник зручності використання – це складений показник, який включає шість різних значень зручності використання. Застосовуючи певну формулу, отримується кінцевий бал від 1 до 10. Однак цей підхід не є загальноприйнятим через різні інтерпретації серед аналітиків. Наприклад, Microsoft проводила дослідження протягом 2,5 років [6], але остаточної та універсально застосовної метрики не вдалося встановити через розбіжності в перспективах оцінювання.

На практиці вищезгадані показники зручності використання залишаються основними інструментами для дослідження UX. Удосконалення продукту проводяться на основі висновків, отриманих з цих показників, але точні розрахунки можна виконати лише після збору вичерпних даних.

Після цього етапу наступний крок включає оцінку результатів дослідження, які містять порівняння продуктів, оцінку функцій, рейтинги метрик та аналітичні методології. Третій етап зосереджений на зборі основних показників зручності використання, визначених на попередньому етапі.

Для демонстрації можливостей UX-досліджень у розробці користувацьких інтерфейсів було обрано інформаційну систему для зберігання та обробки даних. Система працює на рівні капсули класів, де застосовується динамічна маршрутизація для ідентифікації та класифікації ознак.

Проект розроблено на Java, що забезпечує зберігання та обробку даних шляхом синхронізації з базою даних SQLite. В результаті система забезпечує такі функції:

- 1) Авторизація користувача в системі.
- 2) Реалізація інтерфейсів клієнтів для взаємодії.
- 3) Передача даних, що зберігаються у форматі JSON.
- 4) Отримання даних, що зберігаються в базі даних, у SQLite на запит клієнта.

Окрім стандартних операцій, таких як введення даних, модифікація, аналіз та перегляд, система також підтримує:

- Калькулятор ціни продукту для оцінки вартості.
- Відображення пов'язаних продуктів в одному файлі.

Graphical User Interface (GUI) API реалізовано за допомогою Java Abstract Window Toolkit (AWT), розширеного розширеннями TV. Пакет java.awt надає платформо-незалежний API користувацького інтерфейсу, що дозволяє Java-застосункам генерувати графічний вивід та обробляти взаємодію з користувачами. Фреймворк AWT забезпечує сумісність між різними платформами. На рисунку 1 ілюструється ієрархія успадкування віджетів AWT.

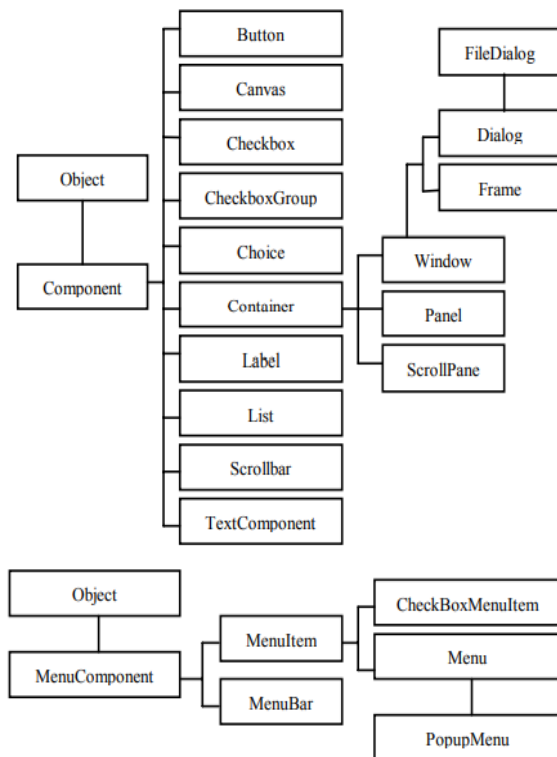


Рисунок 1. Зв'язок успадкування віджетів AWT

Для створення сучасного інтерактивного інтерфейсу програми було обрано певні компоненти AWT (Abstract Window Toolkit) як приклади резидентного набору віджетів графічного інтерфейсу для телеприставок. Серед потенційних кандидатів для реалізації є Button, Checkbox, CheckboxGroup, Dialog, Label, Panel, TextArea, TextComponent та TextField.

Основна перевага використання резидентних віджетів інтерфейсу користувача полягає в їхній здатності оптимізувати продуктивність у мережах з обмеженою пропускною здатністю. Такий підхід дозволяє програмам ефективно масштабуватися без необхідності значних зусиль з переробки.

Компоненти AWT класифікуються як важкі компоненти, тобто вони покладаються на нативні елементи графічного інтерфейсу для рендерингу. Такий дизайн забезпечує нативний інтерфейс, але вимагає додаткових класів Java та платформи-специфічних класів, що робить їх більш ресурсоємними. Ще одним обмеженням є їхня непрозорість, яка обмежує їхню здатність створювати прозорі або непрямокутні компоненти.

Щоб подолати ці обмеження, Java Swing був представлений як більш просунутий інструментарій графічного інтерфейсу. На відміну від AWT, компоненти Swing є легкими, тобто вони не залежать від нативних аналогів і можуть визначати свій власний зовнішній вигляд. Це забезпечує узгоджений вигляд та поведінку на різних платформах. Однак велика кодова база Swing робить його менш придатним для середовищ з обмеженими ресурсами, таких як телеприставки.

Провідні технологічні компанії, такі як Microsoft, Apple та Google, розробили власні стандарти дизайну інтерфейсу користувача (Рисунок 2), щоб підтримувати мінімальний рівень якості та запобігати критичним помилкам дизайну інтерфейсу. Ці стандарти надають розробникам рекомендації, які допомагають створювати інтуїтивно зрозумілі, зручні для користувача та відповідають найкращим галузевим практикам [10].

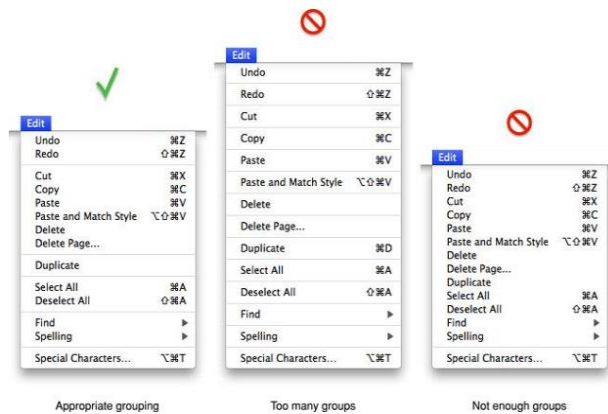


Рисунок 2. Приклад однорідності інтерфейсу з угоди Apple

У складних застосунках забезпечення функціональної повноти іноді може суперечити обмеженням, що накладаються стандартами дизайну інтерактивного інтерфейсу користувача. Протягом виконання програми створюється структура даних – словник компонентів, де кожен ключ представляє назву компонента, а відповідне значення зберігає посилання на цей компонент.

Таким чином, результати підтверджують наукову та прикладну цінність запропонованого підходу, а також відкривають перспективи його подальшої інтеграції у практичні інформаційні системи.

Висновки

У даній роботі запропоновано та реалізовано UX-дослідження в інформаційній системі збереження та обробки інформації, де цінність продукту визначається не лише безпомилковим вирішенням проблем, але й простотою та зручністю використання програми. Навіть функціональний та зручний додаток може залишитися невикористаним, якщо він викликає негативні емоції у користувачів, оскільки це знижує ефективність та збільшує ймовірність помилок. Добре розроблений, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс значно підвищує зручність використання, забезпечуючи максимальну комфортність. Дослідження продемонструвало, що комерційний успіх безпосередньо пов'язаний з простотою використання, чого можна досягти завдяки ретельно розробленому та інтуїтивно зрозумілому користувацькому інтерфейсу.

Процес дослідження проводився за структурованим підходом:

1. Початковий аналіз – оцінка поточного стану інтерфейсу користувача.
2. Огляд літератури – вивчення існуючих досліджень з розробки інтерфейсу користувача.
3. Методи дослідження UX – аналіз алгоритмів та підходів до дослідження UX.
4. Проєктна документація – запис процесу проєктування в пояснювальній записці.

Подальші дослідження можуть розширити цю роботу, проаналізувавши альтернативні методи дослідження UX та розробивши нові стратегії для інтеграції досліджень у різні сфери проєктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Williams, R. (2018). Design for Non-Designers (V. Ovchinnikov, Trans.). Symbol-Plus.
2. Williams, R. (2018). Design Studio (V. Ovchinnikov, V. Timokhin, Trans.). Symbol-Plus.
3. Simons, J. (2018). The Designer's Handbook. Illustration processing (A.V. Bankrashkov, Trans.). AST; Astrel.
4. Twemlow, E. (2018). Graphic design. Corporate identity, latest technologies and catve ideas. AST.
5. Vneeler, A. (2017). Design Brand Identities: An Essential Guide for the World Branding Team. Wiley.
6. Cooper, A. (2009). Psychiatric hospital in the hands of patients.
7. Napoles, V. (2019). Corporate Identity Design. Wiley.
8. Lupton, E. (2018). Graphic Design: The New Basics. Princeton Architectural Press.
9. Belch, G. E. (2018). Advertising and Promotion: An Integrated Marketing Communications Perspective (10th ed.). McGraw-Hill.
10. Gothelf, J. (2018). Lean UX: Designing Great Products with Agile Teams. O'Reilly Media.

Стаття надійшла до редакції 16.07.2025 і прийнята до друку після рецензування 03.09.2025

The article was received 16.07.2025 and was accepted after revision 03.09.2025

Костюк Антон Юрійович

аспірант Університету «Чернігівська політехніка»

Адреса робоча: Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3107-9976> **e-mail:** 1999kostyukanton@gmail.com

Зайцев Сергій Васильович

доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем Університету «Чернігівська політехніка»

Адреса робоча: Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6643-917X> **e-mail:** serza1979@gmail.com

Василенко Владислав Михайлович

кандидат технічних наук, т.в.о. завідувача відділу інформаційних та комунікаційних технологій Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору 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

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

УДК 621.396:004.89

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 NASU, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR IMPROVING THE ACCURACY OF MULTISTATIC LOCALIZATION OF RADIO EMISSION SOURCES

Abstract. *The study addresses the scientific and practical problem of improving the accuracy of localization of radio emission sources (RES) in the high-frequency (HF) band by combining classical direction-finding and amplitude analysis methods with modern intelligent technologies. The relevance of the problem is determined by the fact that traditional methods for determining the coordinates of signals largely depend on ionospheric disturbances, geomagnetic activity, and intentional electronic countermeasures, which significantly reduce their effectiveness.*

The aim of the study is to develop a multistatic architecture of software-defined receivers with embedded convolutional neural network (CNN) modules capable of analyzing spectral-spatial signal characteristics and identifying hidden patterns in input data. The paper describes the principles of constructing algorithms for joint processing of amplitude and angular information, taking into account the electrophysical parameters of the ionosphere and factors of electromagnetic inaccessibility. Simulation results confirmed that the application of a hybrid approach makes it possible to reduce the uncertainty area of localization to 8–30% of its initial size.

Special attention is given to the analysis of localization errors, their physical causes, and minimization methods, which ensure stability and reliability of the system even under conditions of electromagnetic countermeasures. The proposed approach enhances the efficiency of radiomonitoring and electronic intelligence systems.

Keywords: *information technologies, ecosystem, marine waters, geographic information systems, control system, military influence, spectral channels, remote methods.*

В.А. Дзюба

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, м. Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Анотація. *Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання, що полягає у підвищенні точності локалізації джерел радіовипромінювання (ДРВ) у короткохвильовому (КХ) діапазоні шляхом поєднання класичних методів пеленгації та амплітудного аналізу із сучасними інтелектуальними технологіями. Актуальність проблеми зумовлена тим, що традиційні методи визначення координат сигналів значною мірою залежать від впливу іоносферних збурень, геомагнітної активності та навмисних радіоелектронних перешкод, що суттєво знижує їхню ефективність.*

Метою дослідження є розробка багатопозиційної архітектури програмно-керованих приймачів із вбудованими модулями згорткових нейронних мереж (CNN), які здатні аналізувати спектрально-просторові характеристики сигналів та виявляти приховані закономірності у вхідних даних. У роботі описано принципи побудови алгоритмів сумісної обробки амплітудної та кутової інформації, що враховують електрофізичні параметри іоносфери та фактори електромагнітної недоступності. Проведено моделювання, результати якого підтвердили, що застосування гібридного підходу дозволяє зменшити область невизначеності місцезнаходження до 8–30% від початкової. Особливу увагу приділено аналізу похибок локалізації, їхнім фізичним причинам і методам мінімізації, що забезпечує стійкість і надійність системи навіть в умовах електромагнітного протидіювання. Запропонований підхід сприяє підвищенню ефективності систем радіомоніторингу та радіоелектронної розвідки.

Ключові слова: інформаційні технології, екосистема, морські акваторії, геоінформаційні системи, система керування, військовий вплив, спектральні канали, дистанційні методи.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.116-122>

Вступ

У сучасних умовах стрімкого розвитку засобів зв'язку та інформаційного впливу, завдання точного й оперативного виявлення джерел радіовипромінювання (ДРВ) набуває особливої актуальності в контексті забезпечення національної безпеки, моніторингу електромагнітного середовища та протидії радіоелектронним загрозам. Особливо складними є умови локалізації таких джерел у короткохвильовому (КХ) діапазоні, де сигнали зазнають значних спотворень під впливом іоносфери, неоднорідного середовища поширення та радіоелектронного протидіювання.

Традиційні методи пеленгації та тріангуляції, незважаючи на свою простоту й широке застосування, демонструють обмежену ефективність в умовах нестабільності електромагнітного середовища. Зокрема, залежність характеристик поширення сигналу від добових, сезонних та геомагнітних змін у іоносфері унеможливорює гарантування сталої точності локалізації.

У зв'язку з цим виникає об'єктивна потреба у створенні адаптивних систем нового покоління, здатних забезпечити точне визначення координат джерел навіть за умови фрагментарного або спотвореного сигналу. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є застосування методів штучного інтелекту, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN), які здатні опрацьовувати просторово-спектральну інформацію та виявляти приховані закономірності у вхідних даних.

У даній статті запропоновано комплексний підхід до локалізації ДРВ у КХ-діапазоні, що базується на багатопозиційній архітектурі системи спостереження з адаптивними обчислювальними модулями. Об'єднання амплітудного та кутового аналізу з методами глибинного навчання дозволяє суттєво зменшити зону невизначеності розташування джерел та підвищити надійність роботи системи в умовах перешкод. Таким чином, дана робота спрямована на вирішення важливої прикладної проблеми – підвищення точності місцевизначення джерел радіосигналів в умовах складного електромагнітного середовища – шляхом синергії класичних методів радіолокації та сучасних інтелектуальних алгоритмів обробки даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових дослідженнях останніх років (наприклад, [1]–[6]) значна увага приділяється розвитку методів пеленгації та місцевизначення у складних умовах поширення радіосигналів.

Класичні методи, зокрема триангуляційні схеми та амплітудні оцінки, розглядаються як базові інструменти у побудові систем радіомоніторингу, однак їх ефективність суттєво знижується при збуреннях у іоносфері або впливі перешкод.

Особливої актуальності набуває застосування методів штучного інтелекту для обробки сигналів у радіоелектронних системах. Зокрема, згорткові нейронні мережі (CNN) успішно використовуються для аналізу просторово-спектральних характеристик сигналів [9], що дозволяє адаптуватися до умов неповної електромагнітної доступності. У дослідженнях [7], [8] розглянуто моделі іоносфери (NeQuick, IRI), які враховуються при прогнозуванні затухань та відхилень у каналі передачі.

Окремі праці присвячено питанню створення гібридних підходів, які поєднують пеленгацію та амплітудний аналіз із елементами глибинного навчання. Проте більшість із них не враховує динамічну природу радіосередовища та не розглядає сценарії бойового застосування, де важливою є здатність системи до роботи з фрагментарними або зашумленими сигналами в реальному часі.

Таким чином, у сучасній науковій літературі існує певний розрив між класичними методами обробки радіосигналів та інтелектуальними підходами до локалізації джерел. Цей розрив і покликана заповнити запропонована у статті концепція гібридної адаптивної системи.

Мета роботи. Метою статті є підвищення точності визначення координат джерел радіовипромінювання у короткохвильовому діапазоні шляхом поєднання методів амплітудного та кутового аналізу із застосуванням згорткових нейронних мереж.

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

Сучасні методи пеленгації та амплітудного аналізу сигналів у короткохвильовому діапазоні мають суттєві обмеження, що зумовлено складністю поширення електромагнітних хвиль у середовищі з іоносферними збуреннями та дією зовнішніх перешкод. Тому виникає необхідність у використанні більш гнучких і адаптивних підходів, які дозволяють інтегрувати різноманітні дані та підвищувати точність локалізації джерел радіовипромінювання.

У даній роботі було проведено дослідження ефективності багатопозиційних конфігурацій систем радіомоніторингу, що базуються на програмно-керованих приймачах із вбудованими адаптивними модулями. Для аналізу застосовувалися методи системного та спектрального моделювання, які дали змогу оцінити вплив іоносферних факторів на параметри короткохвильових сигналів.

Ключовим елементом дослідження стало використання згорткових нейронних мереж (CNN), здатних обробляти багатовекторні дані амплітудного

та кутового аналізу. Навчання нейромережі здійснювалося на синтетичному датасеті, що містив понад 10 000 варіацій координат джерел та параметрів сигналів. Для оптимізації процесу було використано функцію втрат середньоквадратичної похибки (MSE) та алгоритм Adam із початковим коефіцієнтом навчання 0.001.

Окрім нейромережевої обробки, застосовувалися й класичні методи адаптивної фільтрації та згладжування, які забезпечували зменшення впливу шумів і перешкод. Для оцінки точності моделі використовувалися метрики середньоквадратичної похибки та інтегральної області невизначеності, що дозволило отримати кількісні показники ефективності запропонованого підходу.

Експериментальні випробування проводилися у змодельованому середовищі, яке враховувало реальні фактори електромагнітного протидіювання, зокрема зниження співвідношення сигнал/шум до 3 дБ, а також дію навмисних перешкод. Отримані результати підтвердили, що запропонований метод забезпечує високу стійкість та придатність до практичного застосування в системах радіомоніторингу та радіоелектронної розвідки, істотно перевищуючи точність класичних підходів.

У процесі моделювання багатопозиційної системи місцевизначення джерел радіовипромінювання реалізовано інтеграцію амплітудного аналізу та пеленгаційної інформації, яка у класичному варіанті використовується для розв'язання задач тріангуляції. Основна ідея дослідження полягає у тому, що використання лише однієї характеристики сигналу (амплітуди або напрямку приходу) призводить до значних похибок, особливо у випадках нестабільності іоносфери та дії штучних перешкод. Тому було обрано комбінований підхід, який дозволяє узгоджено аналізувати дані від кількох приймачів та формувати більш точні координатні оцінки.

Математична модель комбінованого підходу, нехай у багатопозиційній системі є m приймачів, що розташовані у відомих координатах $s_i = (x_i, y_i)i$. Кожен приймач формує пару спостережень:

- амплітуду сигналу A_i ,
- кут приходу θ_i .

Тоді задача оцінки координат джерела $\vec{r} = (x, y)$ формулюється як задача мінімізації узагальненої функції похибки:

$$\hat{\vec{r}} = \arg \min_{\vec{r}} J(\vec{r}), \quad (1)$$

де

$$J(\vec{r}) = \alpha \sum_{i=1}^m \left(A_i - \tilde{A}(\vec{r}, s_i) \right)^2 + \beta \sum_{i=1}^m \left(\theta_i - \tilde{\theta}(\vec{r}, s_i) \right)^2, \quad (2)$$

де $\tilde{A}(\vec{r}, s_i)$ та $\tilde{\theta}(\vec{r}, s_i)$ – модельні значення амплітуди та напрямку для точки r , а коефіцієнти α та β задають вагу кожного типу спостережень. Такий підхід дозволяє адаптивно налаштовувати баланс між амплітудною і кутовою складовими залежно від рівня шуму та умов поширення сигналів.

Задача була модифікована шляхом використання згорткової нейронної мережі (CNN), яка апроксимує нелінійне відображення:

$$f: (A_1, \theta_1, \dots, A_m, \theta_m) \mapsto (x, y). \quad (3)$$

Для навчання нейромережі використано синтетичний датасет із понад 104 комбінацій координат джерел та відповідних параметрів сигналів. Вхідні дані були нормалізовані та подані у вигляді матриць спектрально-просторових ознак. Функція втрат визначалася як середньоквадратична похибка:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2], \quad (4)$$

де N – кількість прикладів у вибірці, $\vec{r}_i = (x_i, y_i)$ – справжні координати джерела, $\hat{\vec{r}}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ – прогнозовані координати.

Навчання здійснювалося протягом 100 епох з використанням оптимізатора Adam ($\text{lr} = 0.001$) та розміру батчу 128. У результаті було отримано стале зниження похибки локалізації, що свідчить про ефективність глибокого навчання у задачах багатопозиційної локалізації.

Проведений експеримент показав, що середня точність локалізації за класичним амплітудним методом становила близько $28.5 \text{ км} \times 28.5 \text{ км}$, тоді як пеленгаторний метод зменшив похибку до $21.3 \text{ км} \times 21.3 \text{ км}$. Комбінований підхід без використання нейромереж дозволив досягти точності у $12.8 \text{ км} \times 12.8 \text{ км}$, а застосування CNN дало середню похибку $6.5 \text{ км} \times 6.5 \text{ км}$. Таким чином, відносне покращення у порівнянні з базовими методами становить від 55% до 70%.

Нижче у табл. 1 наведено результати порівняльного аналізу точності локалізації джерел радіовипромінювання різними методами.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз точності локалізації джерел радіовипромінювання різними методами

Метод	Середня похибка, км	Зменшення області, %
Амплітудний	28.5	–
Пеленгаторний	21.3	–
Комбінований (без CNN)	12.8	55
Комбінований з CNN	6.5	82

Зменшення області невизначеності можна формально описати через інтегральний показник:

$$\Delta\Omega = \frac{\Omega_{\text{баз}} - \Omega_{\text{CNN}}}{\Omega_{\text{баз}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де $\Omega_{\text{баз}}$ – площа області ймовірного розташування джерела за класичними методами, Ω_{CNN} – площа після застосування нейромережевої моделі.

Для нашого випадку $\Delta\Omega \approx 82\%$, що підтверджує значне зростання точності.

Отримані результати свідчать, що поєднання амплітудного та кутового аналізу з нейромережевою обробкою даних є більш стійким до впливу шумів та іоносферних спотворень. В умовах низького співвідношення сигнал/шум (до 3 дБ) система зберігала здатність визначати координати з похибкою менше 10% від контрольованої області, що робить її придатною для використання в умовах електронної боротьби та мобільного розгортання систем радіомоніторингу.

Таким чином, результати підтверджують наукову та прикладну цінність запропонованого підходу, а також відкривають перспективи його подальшої інтеграції у практичні системи зв'язку та безпеки.

Висновки

У даній роботі запропоновано та реалізовано нову концепцію багатопозиційного місцевизначення джерел радіовипромінювання у короткохвильовому діапазоні, яка базується на інтеграції амплітудних та напрямкових методів із алгоритмами штучного інтелекту. Використання згорткових нейронних мереж (CNN) дало змогу суттєво підвищити точність визначення координат, зменшивши середню похибку локалізації більш ніж удвічі порівняно з класичними методами.

Отримані результати показали, що застосування CNN дозволяє значно зменшити область ймовірного розташування джерела сигналу, навіть за умов низького співвідношення сигнал/шум та нестабільного іоносферного каналу. Це підтверджує доцільність поєднання традиційних методів обробки сигналів із сучасними нейромережевими підходами для вирішення задач радіомоніторингу та радіоелектронної розвідки.

Особливістю запропонованої методики є її адаптивність, що дає можливість ефективно функціонувати при фрагментарних або зашумлених даних. Такий підхід є перспективним для використання в умовах електромагнітного протистояння, мобільних радіосистем і розподілених сенсорних мереж.

Найближчі напрями подальших досліджень передбачають:

- впровадження методів геопросторової прив'язки отриманих координат до супутникових платформ і систем ГС, що забезпечить масштабний оперативний моніторинг у режимі реального часу;
- аналіз та застосування інших нейромережових архітектур, зокрема LSTM та ResNet, для врахування часових залежностей та підвищення стійкості системи до динамічних змін середовища поширення сигналів;
- створення дослідного зразка системи для апробації у реальних умовах, включно з бойовим застосуванням, з метою оцінки її ефективності у ситуаціях із навмисними радіоелектронними перешкодами;
- адаптацію моделі до середньохвильового та ультракороткохвильового (УКХ) діапазонів, що дозволить розширити сферу використання та забезпечити універсальність системи.

Таким чином, робота робить вагомий внесок у розвиток методів інтелектуального місцевизначення радіосигналів і відкриває широкі можливості для подальших досліджень, спрямованих на інтеграцію радіотехнічних та штучно-інтелектуальних підходів.

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 [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 03.03.2025 і прийнята до друку після рецензування 26.05.2025

The article was received 03.03.2025 and was accepted after revision 26.05.2025

Дзюба Володимир Андрійович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9576-814X> **e-mail:** navvon@ukr.net

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDC 614.842

Yuriy Tsapko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0625-0783> **e-mail:** juriyts@ukr.net

Aleksii Tsapko, PhD, Senior Research Fellow, Department of Building Materials

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068x> **e-mail:** alekseystapko@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

REDUCING THE TOXICITY LEVEL OF WOOD BURNING PRODUCTS DURING EVACUATION OF PEOPLE

Abstract. *The problem of using wood for interior decoration is to ensure resistance to high-temperature flames, so the purpose of the research was to establish the effect of fire protection of wood on reducing flammability, smoke generation and toxicity of combustion products. The establishment of fire hazard factors of wood combustion was carried out by establishing its interaction with high-temperature flames. Based on the results of field tests to determine the process of wood flammability, it was established that wood is a combustible material, impregnated wood withstood the temperature effect and is a difficult-to-burn material. The average value of the smoke generation coefficient for wood in the smoldering mode is 756.11 m²/kg and refers such wood to materials with high smoke generation capacity. Fire-retardant treatment reduces the smoke generation of wood by almost three times. As a result of tests of toxicity of combustion products, the following was established: the level of carboxyhemoglobin in the blood of laboratory animals indicates that the lethal effect is mainly due to the action of carbon monoxide. The minimum value of the HCL50 indicator, determined at a temperature of 400 °C, is for wood treated with "FIREWALL-ATTIC" – 62.5 g/m³ and for "FIREWALL-WOOD" – 73.3 g/m³, respectively, used to establish the value of the toxicity indicator of combustion products and it was established that the studied materials belong to moderately hazardous materials. This material is classified as a material with moderate smoke-forming ability, and in terms of toxicity of combustion products it is moderately hazardous. The practical significance is that the results obtained were taken into account when developing measures for evacuating people. Thus, there are grounds to assert the value of the above study, which is aimed at regulating the combustion processes of wood products. Prospects for further research will be aimed at identifying the point in time at which the fire-retardant properties of wood begin to decline under the influence of high temperature, which will allow us to investigate structural transformations in the material that lead to an increase in the toxicity of combustion products.*

Keywords: smoke formation, toxicity, fire protection of wood, intumescent coatings, flammability group.

Ю.В. Цапко, О.Ю. Цапко

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

ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ТОКСИЧНОСТІ ПРОДУКТІВ ГОРІННЯ ДЕРЕВИНИ ПІД ЧАС ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ

Анотація. Проблема застосування деревини для облаштування приміщень полягає у забезпеченні стійкості до дії високотемпературного полум'я, тому метою досліджень було встановлення впливу вогнезахисту деревини на зниження горючості, димоутворення та токсичності продуктів горіння. Визначення пожежонебезпечних факторів горіння деревини проводили шляхом встановлення взаємодії її з високотемпературним полум'ям. На основі одержаних результатів натурних випробувань з визначення процесу горючості деревини встановлено, що деревина відноситься до горючих матеріалів, просочена деревина витримала температурний вплив і відноситься до важкогорючих матеріалів. Середнє значення коефіцієнта димоутворення для деревини в режимі тління складає $756,11 \text{ м}^3/\text{кг}$ та відносить таку деревину до матеріалів з високою димоутворювальною здатністю. Вогнезахисне оброблення знижує димоутворення деревини майже втричі. У результаті випробувань токсичності продуктів горіння встановлено наступне: рівень карбоксигемоглобіну у крові лабораторних тварин свідчить про те, що смертельний ефект обумовлений, головним чином, дією монооксиду вуглецю. Мінімальне значення показника H_{CL50} , визначене при температурі 400°C , складає для деревини, обробленої «ФАСРВОЛ-АТТІК» – $62,5 \text{ г/м}^3$, а для деревини, обробленої «ФАСРВОЛ-ВУД» – $73,3 \text{ г/м}^3$ відповідно. Це значення використане для визначення величини показника токсичності продуктів горіння та встановлено, що досліджені матеріали відносяться до помірнонебезпечних матеріалів. Даний матеріал класифікується як матеріал з помірно димоутворювальною здатністю, а за токсичністю продуктів горіння – помірно небезпечний. Практичне значення полягає в тому, що отримані результати було враховано під час розроблення заходів при евакуації людей. Таким чином, є підстави стверджувати про цінність наведеного дослідження, яке спрямоване на регулювання процесів горіння виробів з деревини. Перспективи подальших досліджень будуть направлені на виявлення моменту часу, з якого починається падіння вогнезахисних властивостей деревини під впливом високої температури, що дозволить дослідити структурні перетворення у матеріалі, які призводять до підвищення рівня токсичності продуктів горіння.

Ключові слова: димоутворення, токсичність, вогнезахист деревини, спучуючі покриття, група горючості.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.123-138>

Вступ

Деревина набула широкого застосування у будівництві й архітектурі завдяки своїм механічним та експлуатаційним властивостям, але у зв'язку з підвищеною горючістю є пожежонебезпечним матеріалом. Підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів, де використовуються будівельні конструкції з деревини, можливо за допомогою її вогнезахисного оброблення, суть якого полягає у наданні виробам здатності протистояти дії полум'я та поширенню його поверхнею, в запобіганні вільному доступу кисню, який сприяє деструкції матеріалу і прискоренню процесу горіння. Ефективним способом зниження горючості деревини є вогнезахисне оброблення.

Відомі методи забезпечення необхідної межі вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій, які полягають у нанесенні полегшених матеріалів і легких заповнювачів – спученого перліту й вермикуліту, мінерального волокна. Ці матеріали володіють високими теплоізоляційними властивостями або ґрунтовані на використанні плитних і листових теплоізоляційних матеріалів. Це призводить до підвищення матеріалоємності конструкції. Для вогнезахисту будівельних конструкцій з деревини знайшли широке застосування спеціальні покриття на органічній основі, а саме, добавки до в'язучих з поліолефіну, зокрема, хлорпарафіни, які добре поєднуються з полімером, досить ефективні, однак, можуть утворювати висоли; гексахлорціклопентадієн, його димери і аддукти з бутадієном, дівінілбензолом, циклооктадієном, дивініл-бензолом або малеїновим ангідридом; броморганічні циклоаліфатичні з'єднання – гексабромціклододекан, тетрабромціклооктан та ін., які при дії високої температури характеризуються підвищеним димоутворенням та виділенням токсичних продуктів горіння.

Найпростіші вогнезахисні засоби на основі неорганічних в'язучих матеріалів містять зв'язану воду, яка під час нагрівання випаровується і блокує перенос тепла до деревини, а також використовують у своєму складі натрієве рідке скло, портландцемент, глиноземистий цемент і алюмосилікатні в'язучі. Однак, такі покриття є недовговічними та неефективними, а також не забезпечують достатньої адгезійної міцності, що призводить до втрати адгезійних властивостей і осипання під дією коливань температури та вологості. Перспективним напрямком є підвищення вогнестійкості деревини за допомогою епоксидних композицій, які модифіковано мінеральними дисперсними наповнювачами і антипіренами. Однак, такі покриття відносяться до матеріалів з високою димоутворювальною здатністю і токсичністю продуктів горіння.

Таким чином, постає необхідність у проведенні робіт у напрямку розробки ефективних вогнезахисних покриттів, які характеризуються низькою димоутворювальною здатністю та токсичністю продуктів горіння.

У роботі [1] сказано, що професія пожежного передбачає вплив багатьох хімічних речовин, у тому числі багатьох відомих і ймовірних канцерогенів. Ці впливи часто відбуваються при інтенсивних рівнях впливу, незважаючи на наявність автономних дихальних апаратів (SCBA), які не можна використовувати нескінченно довго. Поглинання шкірою є важливим для багатьох хімічних небезпек. Джерелом найбільш токсичних хімічних впливів, які регулярно зустрічаються під час пожежогасіння, є, як правило, горіння, включаючи горіння лігноцелюлозних матеріалів (дерева та паперу), а головне – синтетичних полімерів, які роблять доступним хлор для галогенування багатьох продуктів горіння, утворюючи серед інших токсичних хімічних продуктів діоксини та фурані. Інші продукти горіння включають: поліциклічні ароматичні вуглеводні, деякі з яких є відомими канцерогенами; летючі органічні сполуки, включаючи бензол, потужний канцероген, і галогеновані вуглеводневі сполуки, більш звичні як розчинники, деякі з яких також є відомими або ймовірними канцерогенами; 1,3-бутадієн, канцероген; формальдегід, також канцероген; і нітроарени, деякі з яких є канцерогенами, переважно з дизельних викидів. Дрібні тверді частинки утворюються як від пожежі, так і від дизельних вихлопів. Гостра токсичність чадного газу та ціаніду добре відома. В окремих ситуаціях можна зустріти інші небезпечні

матеріали, такі як азбест і поліхлоровані біфенільні сполуки (ПХБ). Але не згадується про галогеновмісні антипірени, які є новим класом хімічної небезпеки.

Представлена в [2] стаття охоплює дослідження продуктів згоряння обраних природних і синтетичних полімерів та їх основні властивості з точки зору токсичної дії на живі організми і видимість у зоні ураження пожежею. Досліджено зразки берези звичайної (*Betula verrucosa* Ehrh.), дуба звичайного (*Quercus robur* L.), ялини звичайної (*Picea abies* (L.) Karst.), поліетилену та поліпропілену. Досліджувані матеріали порівнювали за токсичністю продуктів згоряння за виходом оксиду вуглецю та за видимістю в ураженій зоні за коефіцієнтом гасіння. Вихід оксиду вуглецю та коефіцієнт екстинкції визначали в конусному калориметрі при тепловому потоці $30 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Отримані дані показують, що деревні матеріали (під час випробування конусним калориметром) демонструють максимальний вихід оксиду вуглецю протягом більш ніж 1000 с після ініціювання (безполум'яна форма горіння – тління). Зразки поліетилену показали максимальний вихід оксиду вуглецю у фазі виникнення полум'я. Поліпропілен продемонстрував чітко виражений локальний максимум виходу монооксиду вуглецю безпосередньо перед фазою ініціювання полум'я, а потім два чітких локальних максимуми безпосередньо перед повним спалюванням зразка. Зразки деревних матеріалів показали два локальних максимуми коефіцієнтів екстинкції. Перший локальний максимум відповідав фазі загоряння полум'я. Другий локальний максимум відповідав часу переходу до безполум'яного горіння. Коефіцієнт гасіння поліетилену, як і поліпропілену, зростав від моменту загоряння до моменту мимовільного згасання полум'я (досягав максимального значення).

Мета дослідження, наведеного в [3], полягала в тому, щоб порівняти концентрації твердих часток (РМ) і пов'язаних з РМ поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАУ) під час згоряння різних типів матеріалів (наприклад, деревини дуба, бука та сосни, поліпропілену, поліуретану, паперу, бавовни та орієнтовано-стружкових плит (OSB)), а також порівняти канцерогенний, мутагенний і токсичний потенціал викидів під час спалювання цих матеріалів. Персональні портативні пробовідбірники використовувалися для відбору проб та визначення концентрації РМ₄, загальної кількості зважених частинок (ЗЧЧ), ПАУ, пов'язаних із РМ. Зразки відбирали під час контрольованих пожеж у лабораторних умовах. Найвища концентрація ТЧ була зафіксована під час спалювання поліуретану (РМ₄-1818 мг/м^3 , ТСП-2800 мг/м^3), тоді як найвища концентрація суміші ПАУ – при спалюванні OSB (628,5 мкг/м^3 РМ₄-зв'язаний; 791,2 мкг/м^3 ТСП-зв'язаний ПАУ). Так, найвищі канцерогенні (85,5 мкг/м^3), мутагенні (68,2 мкг/м^3) та токсичні еквіваленти (26,4 нг/м^3) суміші ПАУ відзначені при спалюванні OSB. Канцерогенний потенціал (КП) групи ПАУ визначався в основному концентраціями фенантрени (КП в середньому 21,6%) і пірену (13,3%). Результати дослідження вказують на можливі несприятливі наслідки пов'язаних із твердими частинками ПАУ, що виділяються під час горіння, для пожежників та інших людей, які перебувають поблизу осередка пожежі.

У роботі [4] сказано, що амонію поліфосфат (APP) вважається ефективним вогнезахисним засобом для дерев'яних матеріалів, але під час згоряння дерев'яних композитів, оброблених APP, виділяються дим і токсичні гази, що створює серйозну загрозу для життя людини на практиці. У цьому дослідженні

ієрархічно пористий модифікований цеоліт 4A APP (H4A-APP) був синтезований шляхом попередньої обробки цеоліту H4A фосфорною кислотою (PA) з подальшою конденсацією на місці з сечовиною. Було виготовлено деревний композит, оброблений H4A-APP, для якого досліджено займистість і вогнетоксичність. Термогравіметричний аналіз (TGA) показав, що швидкість розкладання H4A-APP прискорюється при низькій температурі, а термічна стабільність залишку значно підвищується при високій температурі. Порівняно з деревним композитом, обробленим APP, деревні композити, оброблені H4A-APP, показали на 17,2% нижчий індекс зростання пожежі на ранній стадії (FGI1). Пікова швидкість утворення диму (SPRP) і швидкість утворення CO за 250 с (COPR250s) зразків, оброблених H4A-APP, зменшилися на 35,2% і 38,4% відповідно. Були проведені подальші дослідження мікроструктури та хімічного складу залишків вугілля, які показали, що окрім каталітичного ефекту цеоліту H4A, когерентна поверхня та пориста структура залишків вугілля зі зшиваючими структурами, такими як Si-O-P/C-Si, відіграють важливу роль у зниженні пожежної токсичності.

Робота, яка наведена у [5], мала на меті закрити прогалину в знаннях щодо викидів під час піролізу, тління та згоряння комерційних ізоляційних матеріалів з деревини, целюлози, лугової трави, конопель, джуту, пробки та морських водоростей, а також полістиролу для порівняння. Були проведені лабораторні експерименти та вимірювання продуктів термічного розкладання за допомогою газової хроматографії в поєднанні з мас-спектрометрією (ГХ/МС). Було зрозуміло, що майже всі продукти можна віднести до наступних восьми класів речовин: вуглеводи, альдегіди/кетони, вугільні кислоти/складні ефіри, заміщені феноли, фурани, аліфатичні вуглеводні, заміщені бензоли та поліциклічні ароматичні вуглеводні. Було створено спектри речовин, які показали певні відповідності, особливо між ізоляційними матеріалами, виготовленими з деревини, целюлози та лугових трав, а також коноплі та джуту. Порівняння суми площ піків на ГХ/МС-хроматограмах дало вказівки відносного ступеня викидів продуктів термічного розкладання. Розрахунки відповідно до $(\sum \text{пікові площі відновлюваного матеріалу})/(\sum \text{пікові площі полістиролу})$ показали коефіцієнти від 0,18 (дерево, пробка) до 0,028 (лугові трави). У теплових викидах часто вимірювали визначені небезпечні речовини або групи речовин. Вони були включені до оцінювання токсичності, за допомогою якої, серед іншого, можна було продемонструвати переваги натуральних продуктів порівняно з полістиролом.

У роботі [6] було розроблено різноманітні протоколи та методи випробувань для перевірки токсичності продуктів згоряння будівельних та меблевих матеріалів. Щоб сприяти порівнянню результатів таких тестів, був розроблений стандартний метод кількісного визначення інтенсивності опромінення як оцінки дози. Концентрацію диму (C) розраховували на основі даних про втрату ваги зразка та інтегрували за часом впливу на тварину (t) таким чином, що продукти St отримували в одиницях «мг/л хвилин». Застосування методу було продемонстровано шляхом розрахунку продуктів St на основі даних, наведених у літературі, для сорока п'яти матеріалів, досліджених методом тесту Університету Пітсбурга (UPT). Концентрація диму в окремих матеріалах, випробуваних методом UPT, не була постійною, і деякі матеріали виробляли дим лише протягом третини 30-хвилинного періоду впливу. Деякі показники впливу диму, розраховані за допомогою

запропонованого методу, становили лише від однієї чверті до однієї шостої від того, що випливає з повідомлених значень LC50 (g). Вираження токсичної активності в одиницях St [L(Ct)50's] змінило відносне ранжування деяких матеріалів. Загалом подібні матеріали показали подібні L(Ct)50. Діапазон значень L(Ct)50, особливо для виробів з деревини, виявився вузьким порівняно з діапазоном для чистих газів і парів.

Існують докази, які наведено в [7] і підтверджено статистичними даними про загибель людей на пожежах, що багато смертельних випадків на пожежах відбуваються у результаті втрати працездатності жертв під дією токсичних продуктів, що виділяються на ранніх стадіях пожежі, таким чином перешкоджаючи виходу з пожежі, а не внаслідок прямого впливу тепла чи інших факторів. Важливою частиною розуміння цих проблем було дослідження механізмів втрати працездатності внаслідок впливу продуктів термічного розкладання полімерних матеріалів на атмосферу. Було проведено вимірювання двох видів фізіологічних параметрів: життєво важливі ознаки (дихання, електрокардіографія та респіраторні гази крові) та параметри, що вказують на вплив на нервову систему (електроенцефалографія, слухові викликані потенціали, швидкість нервової провідності). Створені атмосфери були розроблені для вивчення впливу гіпоксії, гіперкапнії, окису вуглецю, ціаніду водню та продуктів термічного розкладання деревини, поліакрилонітрилу, пінополіуретану, поліпропілену, полістиролу та нейлону, вироблених в умовах піролізу або окислення в діапазоні температур. Основні висновки полягали в тому, що склад і, отже, токсичність продуктів з окремих матеріалів можуть значно відрізнятися залежно від різних умов температури та ступеня окиснення, за яких вони розкладалися. Однак, незважаючи на велику складність хімічного складу досліджуваних атмосфер, основний токсичний вплив на тварин був відносно простим, і для кожної окремої атмосфери токсичність завжди визначалася одним із цих факторів: окис вуглецю, ціаністий водень або подразники. Проте невідомо, чи обговорюється роль кожного з цих факторів у виникненні втрати працездатності при реальних пожежах.

Дрібномасштабні випробування на токсичність диму, як зазначено у [8], проводили на електричних неметалевих трубках (ПВХ/ЛОР) на основі полівінілхлориду з використанням протоколу Національного бюро стандартів (NBS) для негарячого горіння. Було визначено LC50 28,5 мг/л ($\pm 9,25$), що віднесло дим ПВХ/ЛОР до категорії токсичності, порівнянну з димом від деревини. Було проведено чотири великомасштабні випробування в кімнаті об'ємом 21 734 л ($8 \times 12 \times 8$ футів). Під час випробувань із застосуванням від 18 до 30 лінійних ін'єкцій ПВХ/ЛОР з джерелами тепла та без них було з'ясовано, що: а) 30 дюймів ПВХ/ЛОР створювали концентрацію диму 3,3 мг/л і недостатню концентрацію HCl, щоб спричинити смерть або значні симптоми у піддослідних тварин (щурів), і б) за наявності відносно невеликого вогню тепло та чадний газ стали обмежувачами для життя раніше, ніж HCl. У додаткових випробуваннях із залученням приблизно 60 дюймів ПВХ/ЛОР, деградованого під тепловим потоком 2,5 Вт/см², було досягнуто концентрації диму 7,6 мг/л. Загибель тварин у цих випробуваннях показала, що смертельні випадки тварин викликані тепловим стресом, а не вдиханням диму. Вимірювані відсотки теоретичного виходу HCl у невеликих тестах коливалися від 64 до 96 відсотків, а у великомасштабних тестах – від 23 до 50 відсотків. Обговорюються причини цих відмінностей.

У роботі [9] сказано, що вогнезахисні матеріали запобігають і сповільнюють поширення вогню, перешкоджаючи горінню даного матеріалу, а в деяких випадках антипірени створюють захисне покриття на поверхні палаючого матеріалу. Вогнезахисний засіб можна використовувати з основним матеріалом як додатковий захисний засіб або хімічно прищепити до матеріалу як реактивний вогнезахисний засіб. Більшість антипіренів виділяють високотоксичні компоненти, які шкідливі для навколишнього середовища. В даний час інтригуюча область дослідницької роботи зосереджена на синтезі та характеристиках екологічно чистих антипіренів, які є новими, ефективними, мають меншу токсичність і є матеріалами на біологічній основі. Натуральні рослинні волокна використовувалися у кількох композиційних сферах, зокрема, в автомобілебудуванні, будівництві та сільському господарстві. У поточній роботі представлені композити, армовані деревним волокном, для використання в якості вогнезахисних виробів. Буде проілюстровано механізм реакції дії антипіренів, а також обговорено хімічні, термічні, механічні та морфологічні властивості вогнезахисних композитів.

Метою роботи є експериментальне дослідження стійкості до впливу термічної дії, димоутворювальної здатності та токсичності продуктів горіння вогнезахисної деревини в умовах натурних випробувань.

Методика дослідження. Для дослідження ефективності вогнезахисту деревини використовували зразки деревини сосни, які обробляли вогнезахисними засобами:

- просочувальним розчином (вогнебіозахисний засіб «ФАЄРВОЛ-АТТІК»);
- вогнезахисним спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД».

Поверхню зразків деревини обробляли вогнебіозахисним просочувальним розчином «ФАЄРВОЛ-АТТІК» з витратою у кількості 270 г/м^2 та покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД» у кількості 241 г/м^2 (рис. 1). Після сушки зразків до постійної маси проводили необхідні дослідження.

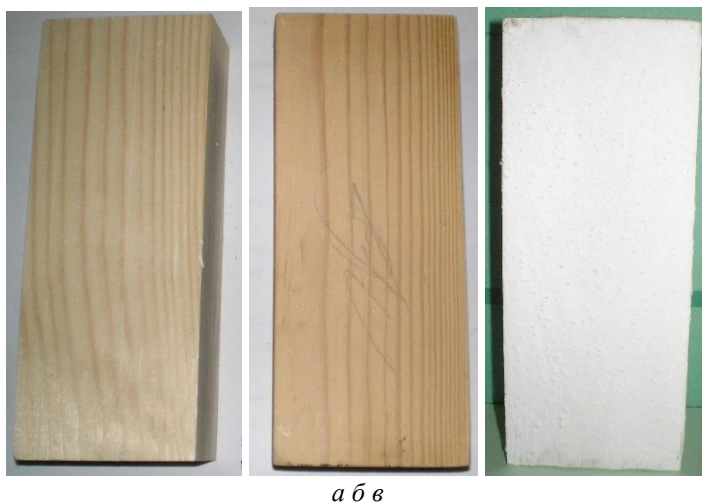


Рис. 1. Модельні зразки вогнезахисної деревини: *а* – необроблений; *б* – оброблений вогнебіозахисним засобом «ФАЄРВОЛ-АТТІК»; *в* – оброблений вогнезахисним спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД»

Для піролізу вогнезахисного матеріалу використовували зразки деревини з середніми розмірами 40×40 мм і висотою 10 мм, які оброблені вогнезахисними покриттями, наведеними вище.

Дослідження з визначення групи горючості деревини, обробленої просочувальними розчинами і покриттям, димоутворювальної здатності та токсичності горіння проводили згідно з [10].

Суть методу випробувань експериментального визначення групи важкогорючої деревини полягає у впливі на зразок, що розташований в установці, полум'я пальника або радіаційної панелі із заданими параметрами.

Під час проведення експериментальних досліджень з визначення групи горючості фіксується максимальний приріст температури газоподібних продуктів горіння (Δt) та втрата маси зразка (Δm).

За результатами випробувань матеріали класифікуються як:

- важкогорючі – $\Delta t < 60$ °C та $\Delta m < 60\%$;
- горючі – $\Delta t \geq 60$ °C чи $\Delta m \geq 60\%$.

При визначенні коефіцієнта димоутворення визначають оптичну провідність утворених димових газів.

У залежності від одержаного коефіцієнта димоутворення розрізняють:

- з малою димоутворювальною здатністю – більше 50 м²/кг;
- з помірною димоутворювальною здатністю – більше 50 м²/кг до 500 м²/кг включно;
- з високою димоутворювальною здатністю – коефіцієнт димоутворення більше 500 м²/кг.

Коефіцієнт димоутворення (D_m) в м²/кг визначається за формулою:

$$D_m = \frac{V}{L \cdot m} \ln \frac{T_0}{T_{\min}}, \quad (1)$$

де V – об'єм камери вимірювання, $V = (0,664 \pm 0,004)$ м³;

L – шлях проходження променя світла у диму, $L = (0,800 \pm 0,002)$ м;

m – маса зразка, кг;

$T_0, T_{\min}$ – відповідно значення початкового та кінцевого світлопропускання, %.

За способом визначення методи випробувань на токсичність продуктів горіння поділяються на статичні та динамічні методи. В статичних методах випробувань визначення проводяться в основному за двостадійною схемою: створення продуктів горіння матеріалів, а далі проведення отруювання піддослідних тварин продуктами горіння в експозиційних камерах та оцінка токсичної дії. В динамічних методах випробувань ці процеси проводять одночасно, тобто умови випробувань є більш наближені до реальних, а також більш гнучкі щодо зміни режимів горіння.

В Україні найбільше розповсюдження отримав метод визначення токсичності продуктів горіння матеріалів, регламентований згідно з ДСТУ 2899 [10].

Метод базується на принципі статичної дії продуктів горіння на піддослідних тварин в експозиційній камері. Камера горіння об'ємом 0,003 м³ забезпечується електронагрівальною панеллю, яка випромінює тепловий потік на зразок матеріалу. Продукти горіння з камери горіння надходять до експозиційної камери через 15 хвилин від початку теплової дії

на зразок, або з моменту досягнення максимальної концентрації в камері горіння CO та CO₂, де протягом 30 хвилин здійснюється отруювання піддослідних білих мишей. В конструкції установки об'єм експозиційної камери може змінюватися, що дозволяє проводити токсикологічні дослідження за сталою масою зразків і змінним об'ємом експозиційної камери, та навпаки – за однаковим об'ємом експозиційної камери і різною масою зразків. Випробування проводяться в одному з двох режимів – термоокиснювального розкладу та полуменевого горіння. Після експозиції установку вентилують протягом 10 хвилин і реєструють кількість загиблих тварин і тварин, які вижили. Надалі продовжують спостереження за останніми протягом 14 діб.

Критерієм вибору режиму основних випробувань має служити найбільша кількість загиблих у порівнювальних групах піддослідних тварин. Залежно від складу матеріалу під час проведення випробувань визначають вихід CO, CO₂, HCN, NO_x, альдегідів та інших речовин. Для оцінки вкладу CO в токсичний ефект вимірюють вміст СОНб – карбоксигемоглобіну в крові піддослідних тварин. Отриманий ряд значень залежності летальності від відносної маси матеріалу застосовують для розрахунку показника токсичності H_{CL50} , г/м³. Розрахунок середніх летальних доз і концентрацій проводять за допомогою пробіт-аналізу [10].

У першій частині випробувань застосування піддослідних тварин не проводиться. Замість цього, радіаційному нагріванню і спалюванню піддається лише зразок матеріалу зручного розміру, масою до 5 грамів. В роботі [11] описується блок відбору проб для апарату реакції горіння.

Хімічний склад продуктів горіння в експозиційній камері спостерігається за допомогою постійного аналітичного моніторингу: CO₂, CO, O₂ та інших токсичних газів, присутність яких прогнозується залежно від хімічного складу матеріалу зразка (тобто, органічних сполук, галогенідів водню, ціаніду водню тощо). Для визначення сумарної концентрації CO в експозиційній камері застосовуються методи інфрачервоної спектроскопії, для галогенів водню, HCN та O₂ – парамагнітні аналізатори.

Загальний період спостережень у випробуваннях становить 30 хвилин, що відповідає терміну експозиції отруювання піддослідних тварин. Після закінчення перших 15 хвилин лампи нагріву вимикають, а димохід, що з'єднує піч і експозиційну камеру, закривають кришкою.

Відомо, що деревину за показником токсичності продуктів горіння відносять до класу високонебезпечних матеріалів, тобто значення H_{CL50} становить 31,6 г/м³ і знаходиться у межах вказаного класу 13-40 г/м³. Якщо за порівняльною оцінкою встановлений токсичний ефект відповідає такому ж, як і для деревини, за умов однакових значень мас зразків, потенційна токсичність таких матеріалів визначається як „прийнятна”. Токсичність продуктів горіння полімерів згідно з їх вимогами не має бути більш токсичною, ніж продукти горіння необробленої деревини згідно з [12]. Вочевидь, що деревині, як еталону, притаманна однорідність структури та властивостей, а також вона не є матеріалом з допустимою токсичністю продуктів горіння.

Основні вимоги до еталонних матеріалів (порошку целюлози) [10] полягають у тому, що виділення СО під час горіння зразків має відповідати таким критеріям: малонебезпечні – не більше 40 мг/г; помірнонебезпечні – від 40 до 120 мг/г; високонебезпечні – 120-360 мг/г; надзвичайно небезпечні – більше 360 мг/г.

У таблиці 1 наведено значення орієнтовних параметрів токсичності за класифікацією матеріалів згідно з [13] із застосуванням шкали небезпеки СО.

Таблиця 1. Класифікація матеріалів за шкалою небезпеки оксиду вуглецю

Клас матеріалів	Межі концен-трації СО, мг/м ³	Значення масового токсико-метричного показника H_{CL50} за терміном експозиції, г/м ³		Очікуваний токсичний ефект та вміст НЬСО у крові
		30 хв	60 хв	
Мало-небезпечні	до 400	> 120	> 90	НЬСО = 10-20%, зниження працездатності, головний біль
Помірно небезпечні	400-1200	40-120	30-90	НЬСО = 20-40%, симптоми виразного труїння, але здатність до самостійного пересування не втрачена
Високо-небезпечні	1200-3600	13-40	10-30	НЬСО = 40-90%, нерухомість, загибель
Надзвичайно небезпечні	> 3600	до 13	до 10	Загибель за більш короткий термін дії

Вищенаведені рівні виділення СО „еталонними” матеріалами застосовано для обчислення очікуваних результатів значень H_{CL50} як за 60-хвилинною, так і за 30-хвилинною експозицією, враховуючи, що зони гострої дії під час горіння еталонних матеріалів практично однакові для людини за 60- та 30-хвилинної експозиції H_{CL50} [14].

У тих випадках, коли величина H_{CL50} з урахуванням стандартної похибки відповідає крайнім значенням показника двох суміжних класів, до уваги приймають додаткові відомості щодо їх токсичності: режим випробувань, дані про хімічний склад продуктів горіння тощо [15].

Основна частина

Для встановлення вогнезахисної ефективності при дослідженні просочувального розчину і покриттів були проведені дослідження щодо визначення групи горючості деревини при обробленні зазначеними композиціями. Результати досліджень з визначення втрати маси зразків (Δm , %) та приросту максимальної температури газоподібних продуктів горіння (Δt , °C) зразків вогнезахисної деревини, проведених у лабораторних умовах, наведено на рис. 2, 3.

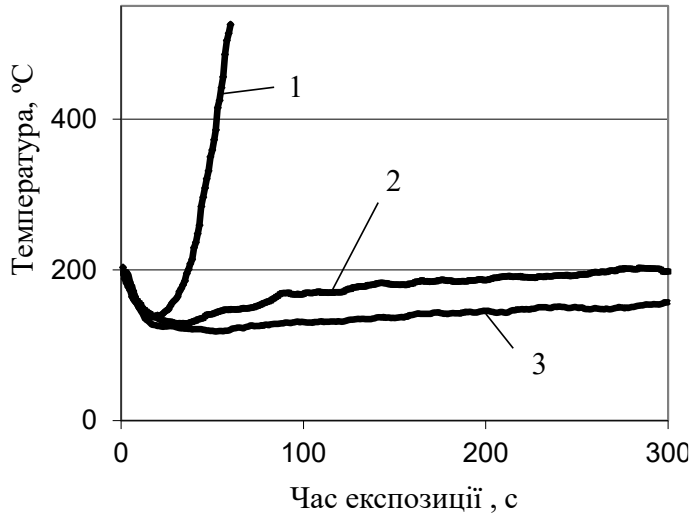


Рис. 2. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях вогнезахисної деревини: 1 – необроблена; 2 – оброблена засобом «ФАЄРВОЛ-АТТІК»; 3 – оброблена спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД»

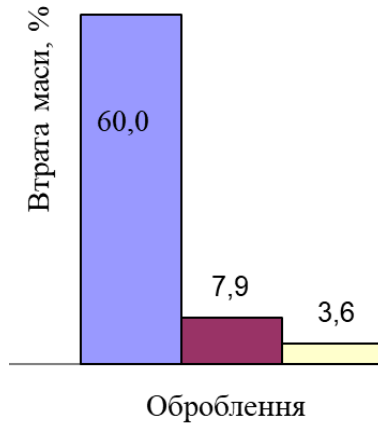


Рис. 3. Результати втрати маси зразків Δm , % вогнезахисної деревини: 1 – необроблена; 2 – оброблена засобом «ФАЄРВОЛ-АТТІК»; 3 – оброблена спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД»

Дослідження показали (рис. 2, 3), що деревина відноситься до горючих матеріалів, просочена деревина витримала температурний вплив і відноситься до важкогорючих матеріалів за показником втрати маси. При початковій температурі газоподібних продуктів горіння у 200 °C, при дії полум'я пальника на захищений зразок неорганічним покриттям (крива 2), температура газоподібних продуктів горіння становила менше 210 °C, а втрата маси не перевищила 8% (рис. 2). Ще більшу ефективність показали зразки, які були оброблені спучуючим покриттям з втратою маси 3,6% та температурою газоподібних продуктів горіння менше 180 °C (зразок 3) (рис. 2).

У табл. 2 наведено результати для кожного з режимів випробувань коефіцієнта димоутворення, зокрема, для необробленої деревини та вогнезахищеної деревини: просочувальним засобом, спучуючим покриттям.

Таблиця 2. Результати випробувань коефіцієнта димоутворення деревини

Режим випробувань та густина теплового потоку	Номер зразка для випробувань	Маса зразка (m), кг×10 ⁻³	Світлопропускання, %		Коефіцієнт димоутворення для кожного зразка (D _m), м ² /кг
			(T ₀) початкове	(T _{min}) кінцеве	
Полуменеве горіння (35 кВт/м ²)	Необроблена	0,75	100	51	674,45
	Оброблена «ФАЄРВОЛ-АТТІК»	0,79	100	80	224,20
	Оброблена «ФАЄРВОЛ-ВУД»3	0,83	100	87	140,26
Тління (35 кВт/м ²)	Необроблена	0,76	100	47	756,11
	Оброблена «ФАЄРВОЛ-АТТІК»	0,80	100	76	275,47
	Оброблена «ФАЄРВОЛ-ВУД»3	0,82	100	85	238,65

Середнє значення коефіцієнта димоутворення для деревини в режимі тління складає 756,11 м²/кг та відносить таку деревину до матеріалів з високою димоутворювальною здатністю. Вогнезахисне оброблення знижує димоутворювальну здатність деревини майже втричі. Даний матеріал класифікується як з помірною димоутворювальною здатністю.

На першому етапі визначення токсичності продуктів горіння вогнезахищеної деревини було проведено санітарно-хімічні випробування в режимі термоокислювальної деструкції (400 °С) та полум'яного горіння при температурі 750 °С. Як зразок для порівняння використовували деревину сосни з сухою питомою густиною 0,443 г/см³. Зразки кондиціювали у лабораторних умовах не менше 48 годин. Результати санітарно-хімічних випробувань деревини, вогнезахищеної просочувальним засобом «ФАЄРВОЛ-АТТІК» та спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД», наведено у табл. 3.

Як видно з таблиці 3, при горінні матеріалу у повітрі запалювальної камери були визначені монооксид та діоксид вуглецю, у концентраціях, що можуть викликати гостре отруєння експериментальних тварин, а також інших у токсикологічно безпечних концентраціях (з позицій гострої токсичності).

На наступному етапі були проведені токсикологічні випробування, метою яких є визначення показника токсичності (HCL50), який характеризується як відношення кількості матеріалу до одиниці об'єму замкнутого простору, продукти згоряння якого викликають загибель 50% піддослідних тварин. Експозиція становила 30±0,5 хв., концентрація кисню у камері перевищувала 18%. При випробуваннях використовували білих мишей вагою 20,0±2,0 г.

Таблиця 3. Міграція компонентів при моделюванні умов горіння деревини

Компонент	Визначені кількості продуктів горіння, мг/г			
	Деревина оброблена «ФАЄРВОЛ-АТТІК»		Деревина оброблена «ФАЄРВОЛ-ВУД»	
	400 °C	750 °C	400 °C	750 °C
Монооксид вуглецю	122,6	116,9	104,3	96,7
Діоксид вуглецю	351,3	422,6	289,4	327
Оксиди азоту	0,9	1,8	н.в.	1,3
Водень ціаністий	0,06	н.в.	0,03	н.в.
Фенол	0,88	0,17	0,86	0,21
Оцтова кислота	6,4	3,6	5,8	1,8
Формальдегід	0,07	0,008	0,09	0,13
Вуглеводні C ₁ -C ₁₀	3,2	2,3	2,2	0,9
Бензол	н.в.	3,6	3,7	2,14
Бутанол	0,5	н.в.	0,2	н.в.
Метанол	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
Ацетон	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
Акрилонітрил	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
Водень хлористий	0,72	3,1	0,64	0,97
Акролеїн	0,04	0,2	0,22	0,29
Аміак	1,48	0,3		
Втрата маси	63,4%	72,8%	62,4%	69,9%

У кожному температурному режимі знаходили ряд значень залежності загибелі тварин від відношення маси зразку до об'єму експозиційної камери, який використовували для розрахунку показника токсичності H_{CL50} за допомогою пробіт-аналізу [12]. Результати представлені в табл. 4.

Таблиця 4. Результати розрахунків H_{CL50} для вогнезахищеної деревини

Наважка, г	Смертність, %	Місце концентрацій	Пробіти	Ваговий коефіцієнт
Деревини, обробленої просочувальним засобом «ФАЄРВОЛ-АТТІК»				
50,0	0	1,0	3,04	1,0
55,0	20	2,0	4,16	3,7
60,0	50	3,0	5,00	5,0
65,0	80	4,0	5,84	3,9
70,0	100	5,0	6,96	1,0
Деревини, обробленої спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД»				
65,0	0	1,0	3,04	1,0
70,0	30	2,0	4,48	4,7
75,0	50	3,0	5,00	5,0
80,0	80	4,0	5,84	3,9
85,0	100	5,0	6,96	1,0

Масова доля карбоксигемоглобіну в крові лабораторних тварин визначалась спектрофотометричним методом. Результати токсикологічних випробувань наведено у табл. 5.

Таблиця 5. Результати токсикологічних випробувань вогнезахищеної деревини

400 °C				750 °C			
«ФАЄРВОЛ-АТТІК»		«ФАЄРВОЛ-ВУД»		«ФАЄРВОЛ-АТТІК»		«ФАЄРВОЛ-ВУД»	
H_{CL50} , г/м ³	НВСО, %	H_{CL50} , г/м ³	НВСО, %	H_{CL50} , г/м ³	НВСО, %	H_{CL50} , г/м ³	НВСО, %
62,5	65,2	73,3	62,8	68,4	62,7	84,2	57,8

Таким чином, в результаті випробувань токсичності продуктів горіння встановлено наступне: рівень карбоксигемоглобіну у крові лабораторних тварин свідчить про те, що смертельний ефект обумовлений, головним чином, дією монооксиду вуглецю. Мінімальне значення показника H_{CL50} , визначене при температурі 400 °C, складає для деревини, обробленої «ФАЄРВОЛ-АТТІК» – 62,5 г/м³ і «ФАЄРВОЛ-ВУД» – 73,3 г/м³ відповідно. Це значення використане для встановлення величини показника токсичності продуктів горіння згідно з класифікацією за ДСТУ 8829 [10]. За цим показником досліджені матеріали відносяться до помірнонебезпечних матеріалів.

Висновки

1. Дослідження показали, що деревина відноситься до горючих матеріалів, просочена деревина витримала температурний вплив і відноситься до важкогорючих матеріалів за показником втрати маси. При початковій температурі газоподібних продуктів горіння у 210 °C, при дії полум'я пальника на захищений зразок неорганічним покриттям, температура газоподібних продуктів горіння становила менше 260 °C, а втрата маси не перевищила 8%. Ще більшу ефективність показали зразки, які були оброблені спучуючим покриттям, з втратою маси 3,6% та температурою газоподібних продуктів горіння менше 180 °C.

2. Середнє значення коефіцієнта димоутворення для деревини в режимі тління складає 756,11 м²/кг та відносить таку деревину до матеріалів з високою димоутворювальною здатністю. Вогнезахисне оброблення знижує димоутворення деревини майже втричі, даний матеріал класифікується як з помірно димоутворювальною здатністю.

3. У результаті випробувань токсичності продуктів горіння встановлено наступне: рівень карбоксигемоглобіну у крові лабораторних тварин свідчить про те, що смертельний ефект обумовлений, головним чином, дією монооксиду вуглецю. Мінімальне значення показника H_{CL50} , визначене при температурі 400 °C, складає для деревини, обробленої «ФАЄРВОЛ-АТТІК» – 62,5 г/м³ і для «ФАЄРВОЛ-ВУД» – 73,3 г/м³ відповідно. Це значення використане для визначення величини показника токсичності продуктів горіння та встановлено, що досліджені матеріали відносяться до помірнонебезпечних матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Guidotti, T.L. (2016). Toxic hazards. Health Risks and Fair Compensation in the Fire Service. 63–92. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23069-6_5
2. Martinka, J., Wachter, I., Rantuch, P., Balog, K. (2017). Key properties of combustion products and their application in fire safety engineering. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 17(43), 421–428. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2017H/43/S19.053>
3. Bralewska, K., Rakowska, J. (2020). Concentrations of particulate matter and pm-bound polycyclic aromatic hydrocarbons released during combustion of various types of materials and possible toxicological potential of the emissions: The results of preliminary studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(9), 3202. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17093202>
4. Zhang, S., Chen, Z., Ding, M., Yang, T., Wang, M. (2020). Reducing the fire toxicity of wood composites using hierarchically porous 4A (H4A) zeolite modified ammonium polyphosphate (APP) synthesized by a facile in-situ method. *Construction and Building Materials*. 262, 120754. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120754>
5. Wichmann, H., Kolb, M., Bulutcu, D., et al. (2023). Analytical determination of compounds released during pyrolysis, smoldering, and combustion experiments with insulation materials from renewable resources. *Fire and Materials*. 47(1), 3–15. <https://doi.org/10.1002/fam.3064>
6. Alexeeff, G.V., Packham, S.C. (2023). Evaluation of smoke toxicity using concentration-time products. *Advances in Combustion Toxicology. Volume I*, 202–219. DOI: <https://doi.org/10.1177/073490418400200504>
7. Purser, D.A., Woolley, W.D. (2023). Biological studies of combustion atmospheres. *Advances in Combustion Toxicology. Volume I*, 38–64. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003418948-4>
8. Packham, S.C., Crawford, M.B. (2023). An evaluation of smoke toxicity and toxic hazard of electrical nonmetallic tubing combustion products. *Advances in Combustion Toxicology. Volume I*, 96–118. DOI: <https://doi.org/10.1177/073490418400200105>
9. Phiri, M.J., Phiri, M.M., Mzinyane, N.M., Hlangothi, S.P. (2024). Wood Flour and Other Fiber Composites: Properties and Flame Retardancy. *Engineering Materials, Part F3640*. 163–184. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-6871-4_8
10. Zhartovsky, S.V., Leonova, D.I. (2007). Combustibility and toxicity studies of fire-resistant plywood boards. *Actual problems of transport medicine*. 2(8). 78-83. [Жартовский С.В., Леонова Д.И. (2007). Исследование огнезащищенных фанерных плит на горючесть и токсичность. Актуальні проблеми транспортної медицини. № 2 (8). 78-83]. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/22793>
11. Hauk, A., Sklorz, M., Bergmann, G., Hutzinger, O. (1994). Analysis and toxicity testing of combustion gases I. A new sampling unit for collection of combustion products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 28/1, 1-12. [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(93\)00759-G](https://doi.org/10.1016/0165-2370(93)00759-G)
12. Williams, S. J., Clarke, F. B. (1982). Combustion Product Toxicity: Dependence on the Mode of Product Generation. E. I. Dupont de Nemours and Co., Inc., Haskell Laboratory for Toxicology, Newark, Delaware 19711 and Benjamin Clarke Associates, Inc., Kensington, Maryland 20895, 1982. USA. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/fam.810060309>
13. Huggett, C. (1984). Combustion Conditions and Exposure Conditions for Combustion Product Toxicity Testing. *Journal of Fire Sciences*. 2/5. DOI: <https://doi.org/10.1177/073490418400200502>
14. Wakefield, J.C. Combustion products: a toxicological review. Retrieved 2025, March 23 from <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a74afd1ed915d0e8e39a374/HPA-CHaPD-004>
15. Stec, A., Hull, R. (2010). Fire Toxicity. *Book*. 668-688. <https://www.sciencedirect.com/book/9781845695026/fire-toxicity#book-info>

Стаття надійшла до редакції 13.03.2025 і прийнята до друку після рецензування 09.06.2025

The article was received 13.03.2025 and was accepted after revision 09.06.2025

Цапко Юрій Володимирович

д.т.н., професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0625-0783> **e-mail:** juriys@ukr.net

Цапко Олексій Юрійович

PhD, доцент кафедри будівельних матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068x> **e-mail:** alekseysapko@gmail.com

УДК 504.75.05

Oleksandr Kovrov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0782-7767> **e-mail:** kovrov.o.s@nmu.one

Daria Kulikova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0874-0188> **e-mail:** kulikova.d.v@nmu.one

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

INVESTIGATION OF THE CORRELATION BETWEEN HYDROCHEMICAL PARAMETERS OF SAMARA RIVER AND POPULATION HEALTH

Abstract. *The anthropogenic load on the components of the natural environment in most regions has reached a level that threatens the population's health. The high pollution level of water sources is associated with excessive discharge of untreated and/or insufficiently treated wastewater from various sectors of the national economy. It directly or indirectly leads to a deterioration in sanitary and hygienic conditions and the spread of multiple diseases among the population. The purpose of the study is to establish the cause-and-effect relationship between the qualitative and quantitative state of the surface waters of the Samara River and certain classes of diseases of the population living in the territory of the Western Donbas region.*

Materials and methods of the study. The relationship between the qualitative and quantitative state of the surface waters of the Samara River and certain classes of diseases of the population was established using the method of statistical analysis based on the calculation of Pearson correlation coefficients with the determination of the confidence probability by comparing the calculated reliability criteria of the obtained correlation coefficients with the critical value of the Student t-criterion at different levels of significance. The study used statistical data from the State Statistics Service of Ukraine and the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine for 2011-2022.

Research results. With a high degree of probability, a direct relationship was proven between the increase in certain diseases of residents of the considered territory and the presence of pollutants in the studied reservoir. The following classes of diseases were most closely related to the qualitative and quantitative state of water: diseases of the blood and hematopoietic organs; diseases of the endocrine system; diseases of the circulatory system; diseases of the digestive system; diseases of the skin and subcutaneous tissue. Based on the results obtained, it will be possible to develop an operational system of environmental protection measures and measures to preserve the health of the population living in the surrounding areas.

Keywords: *water quality, pollution, population morbidity, correlation dependence.*

О.С. Ковров, Д.В. Кулікова

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ГІДРОХІМІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ РІЧКИ САМАРА ТА СТАНОМ ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ

Анотація. Техногенне навантаження на компоненти навколишнього природного середовища в більшості регіонах планети досягло рівня, що є загрозою для здоров'я населення. Високий рівень забруднення водних джерел пов'язаний з надмірним скидом неочищених та/або недостатньо очищених стічних вод різних галузей народного господарства. Це прямо чи опосередковано призводить до погіршення санітарно-гігієнічних умов та розповсюдження різних видів захворювань серед населення.

Мета дослідження полягає у встановленні причинно-наслідкового взаємозв'язку якісно-кількісного стану поверхневих вод річки Самара і певних класів захворювань населення, що мешкає на території Західно-Донбаського регіону.

Матеріали та методи дослідження. Взаємозв'язок якісно-кількісного стану поверхневих вод річки Самара і певних класів захворювань населення встановлювався за допомогою методу статистичного аналізу на основі розрахунку коефіцієнтів кореляції Пірсона з визначенням довірчої ймовірності шляхом порівняння розрахованих критеріїв достовірності отриманих коефіцієнтів кореляції з критичним значенням t-критерію Стьюдента при різних рівнях значущості. При дослідженні використовувалися статистичні дані Державної служби статистики України і Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України за період 2011-2022 роки.

Результати дослідження. З високою частотою вірогідності доведено прямий зв'язок між збільшенням певних класів захворювань мешканців даної території та наявністю забруднюючих речовин у досліджуваній водоймі. Найбільш пов'язаними з якісно-кількісним станом води виявилися такі класи захворювань: хвороби крові і кровотворних органів; хвороби ендокринної системи; хвороби системи кровообігу; хвороби органів травлення; хвороби шкіри та підшкірної клітковини. На підставі отриманих результатів у майбутньому буде можлива розробка оперативної системи природоохоронних заходів та заходів щодо збереження здоров'я населення, що мешкає на прилеглих територіях.

Ключові слова: якість води, забруднення, захворюваність населення, кореляційна залежність.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.139-152>

Вступ

Гігантські масштаби індустріалізації країни, видобуток мінеральної сировини та енергетичних ресурсів призводять до подальшого посилення антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище, забруднення компонентів довкілля промисловими викидами, скидами і відходами. Все це прямо чи опосередковано впливає на умови життя людей, суттєво змінює природні, в тому числі й кліматичні, процеси та якість довкілля і здоров'я населення.

Проблема чистої води найбільш гостро стоїть у щільно населених та розвинених у господарському відношенні районах країни, де подальше зростання населення, промислового та сільськогосподарського виробництва залежить від водних ресурсів.

Інтенсивне використання водних ресурсів спричиняє різкі зміни їхніх якісних параметрів, внаслідок скиду у водойми найрізноманітніших забруднювачів антропогенного походження.

Підвищення вмісту у воді небезпечних елементів (важкі метали та їхні сполуки) відбувається внаслідок безпосереднього скиду стічних вод у поверхневі водойми, змивання з територій промислових та урбанізованих ділянок, випадіння із забрудненої атмосфери, вилуговування кислотними опадами з відвалів на водозборі. В комплексі це призводить до збагачення вод великим спектром мікроелементів, багато з яких є токсичними для людини.

Водні об'єкти є кінцевими акумуляторами всіх видів забруднення. Вони тією чи іншою мірою визначають сумарну дозу забруднюючих речовин, що надходять у навколишнє середовище. В досліджуваному регіоні з розвинутою гірничодобувною промисловістю провідним фактором довкілля, що негативно впливає на здоров'я населення, є забруднення водних об'єктів – джерел питного постачання населення. З питною водою забруднюючі речовини здатні проникати в організм, накопичуватися та обумовлювати захворювання населення.

На теперішній час пропонуються різні методи та способи вирішення проблеми забруднення водних об'єктів, розташованих в районі вуглевидобутку [1-4], вдосконалюються конструкції очисних споруд і технологічні схеми водовідведення [5-14], але не відомо, які саме забруднюючі речовини більшою мірою впливають на здоров'я людини.

Система очищення води, що використовується на станціях водопідготовки, неефективна по відношенню до металів. Їхній вміст у воді при подачі населенню мало відрізняється від вмісту в природних водах поблизу водозабору, а в деяких випадках навіть стає більшим. Дослідження питних вод та зміни вмісту металів на різних стадіях водопідготовки показали, що вода не тільки не очищується від металів, але відбувається наростання їхньої концентрації (зокрема, Fe та Mn), внаслідок вилуговування із трубопроводів у процесі подачі води населенню [15, 16].

Використання такої води населенням для господарсько-питних чи культурно-побутових цілей може призвести до негативних наслідків для здоров'я людей [17].

Дані медичних досліджень свідчать про те, що майже 80% усіх захворювань населення нашої планети пов'язані з порушенням санітарно-гігієнічних норм водопостачання та незадовільною якістю питної води [18].

На теперішній час антропогенне навантаження на різні компоненти навколишнього середовища в багатьох регіонах нашої планети вже досягло рівня, що загрожує здоров'ю населення. Вплив несприятливих чинників довкілля призводить до змін функціонального стану органів людини, підвищення рівня захворюваності, збільшення кількості людей з інвалідністю, передчасного старіння нації та скорочення тривалості життя.

Небезпечні хімічні речовини можуть потрапляти до організму людини разом з їжею, водою та/або повітрям. Саме тому дуже складно встановити зв'язок між якісним станом поверхневих водойм та здоров'ям населення, що

мешкає на прилеглих територіях. Багато досліджень проведено з метою оцінки стану компонентів навколишнього середовища, які перебувають під надмірним впливом антропогенного навантаження того чи іншого регіону [19, 20], але до сих пір не була встановлена кореляційна залежність між показниками забруднення поверхневих водойм та класами захворювання населення, що мешкає на досліджуваній території.

Метою роботи є встановлення причинно-наслідкового взаємозв'язку між якісно-кількісним станом поверхневих вод річки Самара та певними класами захворювань населення, що мешкає на території Західно-Донбаського регіону, за допомогою методу статистичного аналізу на основі розрахунку коефіцієнтів кореляції Пірсона з визначенням довірчої ймовірності шляхом порівняння розрахованих критеріїв достовірності отриманих коефіцієнтів кореляції з критичним значенням t -критерію Стюдента при різних рівнях значущості.

Методика дослідження

Статистика розробила безліч методів вивчення зв'язків, вибір яких залежить від цілей дослідження та поставлених завдань. Ознаки за значенням вивчення взаємозв'язку поділяються на два класи. Ознаки, що зумовлюють зміну інших, пов'язаних із ними ознак, називаються факторними (X -незалежний фактор). Ознаки, що змінюються під дією факторних ознак, називаються результативними (Y -залежний фактор).

Мірою взаємозв'язку двох випадкових величин є критерій, який отримав назву коефіцієнта кореляції. Коефіцієнт кореляції є безрозмірною величиною, і його значення не залежить від одиниць виміру випадкових величин X і Y . Оцінюючи сили зв'язку коефіцієнтів кореляції, використовується шкала Чеддока, подана в табл. 1 [21].

Таблиця 1. Шкала оцінки сили зв'язку коефіцієнтів кореляції

Величина коефіцієнта кореляції	Характеристика сили зв'язку
$0 < r_{xy} < 0,100$	майже відсутній зв'язок
$0,101 < r_{xy} < 0,300$	слабкий зв'язок
$0,301 < r_{xy} < 0,500$	помірний зв'язок
$0,501 < r_{xy} < 0,700$	зв'язок середньої сили
$0,701 < r_{xy} < 0,900$	сильний зв'язок
$0,901 < r_{xy} < 1,000$	дуже сильний зв'язок

Для оцінки ступеня взаємозв'язку між двома вибірками найбільшого поширення набув коефіцієнт лінійної кореляції (Пірсона), що передбачає нормальний закон розподілу спостережень. Він заснований на припущенні, що за повної незалежності ознак X і Y відхилення значень факторної ознаки від середньої $(X_i - \bar{X})$ мають випадковий характер і повинні випадково поєднуватися з різними відхиленнями $(Y_i - \bar{Y})$. За наявності значної переваги збігів або розбіжностей таких відхилень робиться припущення про наявність зв'язку між X і Y .

Щоб розпочати розрахунки коефіцієнта кореляції Пірсона необхідно виконання наступних умов:

1. Досліджувані параметри X та Y мають бути розподілені нормально.
2. Досліджувані параметри X та Y повинні бути виміряні в інтервальній шкалі або шкалі відносин.

3. Кількість значень досліджуваних параметрів X і Y має бути однаковою.

Алгоритм обчислення коефіцієнта кореляції Пірсона наступний [21]:

1. Побудувати статистичні ряди для кожної із зіставляваних ознак, позначивши перший і другий ряд чисел відповідно X_i та Y_i .

2. Визначити для кожного статистичного ряду середні арифметичні значення за формулами:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (1)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}, \quad (2)$$

n – кількість статистичних спостережень (об'єктів у вибірці).

3. Знайти відхилення кожного із чисел статистичного ряду від значення своєї середньої арифметичної за формулами:

$$D_x = (X_i - \bar{X}), \quad (3)$$

$$D_y = (Y_i - \bar{Y}). \quad (4)$$

4. Отримані відхилення перемножити ($D_x \cdot D_y$) та підсумовувати їх ($\sum(D_x \cdot D_y)$).

5. Кожне відхилення звести в квадрат і підсумовувати по кожному статистичному ряду ($\sum(D_x)^2$ та $\sum(D_y)^2$).

6. Підставити отримані значення у формулу для розрахунку коефіцієнта кореляції Пірсона:

$$r_{xy} = \frac{\sum(D_x \cdot D_y)}{\sqrt{(\sum(D_x)^2 + \sum(D_y)^2)}}. \quad (5)$$

7. Інтерпретуючи значення лінійного коефіцієнта кореляції, слід мати на увазі, що він розрахований зазвичай для обмеженого числа спостережень і схильний до випадкових коливань, як і самі значення параметрів X і Y , на основі яких він був встановлений. Іншими словами, як будь-який вибірковий показник, він містить випадкову помилку і не завжди однозначно відображає дійсний реальний зв'язок між параметрами, що вивчаються. Звідси нерідко виникає питання надійності отриманого результату. Для того, щоб оцінити суттєвість (значимість) самого лінійного коефіцієнта кореляції та відповідно реальність вимірюваного зв'язку між параметрами X та Y , необхідно розрахувати середню квадратичну помилку коефіцієнта кореляції Пірсона за формулою:

$$m_r = \sqrt{\frac{1 - (r_{xy})^2}{n - 2}}. \quad (6)$$

8. Щоб перевірити, чи значущі параметри, тобто чи вони відрізняються від нуля, для генеральної сукупності використовують статистичні методи перевірки гіпотез.

Перевірка статистичних гіпотез – це процес формування рішення про можливість прийняти чи спростувати твердження (гіпотезу), що ґрунтується на інформації, отриманій з аналізу вибірки.

В якості основної (нульової) гіпотези висувають твердження про незначну відмінність від нуля параметра або статистичної характеристики в генеральній сукупності, тобто всі події сталися випадково, природним чином. Поряд з основною гіпотезою, що перевіряється, висувають альтернативну (конкуруючу) про нерівність нулю параметра або статистичної характеристики, тобто події випадковим чином відбутися не могли і мав вплив певний чинник. Якщо основна гіпотеза виявиться неправильною, приймається альтернативна.

Зазвичай, нульова гіпотеза формулюється таким чином, щоб на підставі експерименту або спостережень її можна було відкинути із заздалегідь заданою ймовірністю помилки p . Ця заздалегідь задана ймовірність помилки називається рівнем значущості.

Рівень значущості – максимальне значення ймовірності появи події, при якому подія вважається практично неможливою. В статистиці найбільшого поширення набув рівень значущості, що дорівнює $p=0,05$. Тому, якщо ймовірність, з якою подія, що цікавить, може статися випадковим чином $p<0,05$, то прийнято вважати цю подію малою ймовірною, і якщо вона все ж таки відбулася, то це не було випадковим. У найбільш відповідальних випадках, коли потрібна особлива впевненість у достовірності отриманих результатів, надійності висновків, рівень значущості приймають рівним $p=0,01$ або навіть $p=0,001$.

Величину P , що дорівнює $(1-p)$, називають довірчою ймовірністю (рівнем надійності), тобто ймовірністю, визнаною достатньою для того, щоб впевнено судити про прийняте статистичне рішення. Відповідно, в якості довірчих ймовірностей вибирають значення 0,95, 0,99 або 0,999.

Інтервал, в якому із заданою довірчою ймовірністю $P=(1-p)$ знаходиться параметр, що оцінюється, називається довірчим інтервалом. Відповідно до довірчих ймовірностей на практиці використовуються 95-, 99-, 99,9-відсоткові довірчі інтервали.

Для перевірки гіпотез використовують так звані статистичні критерії відмінності, які поділяються на параметричні та непараметричні. Параметричні критерії служать для перевірки гіпотез про параметри певних розподілів генеральної сукупності (найчастіше нормального розподілу). З параметричних критеріїв найбільшою популярністю під час перевірки гіпотез про рівність генеральних середніх (математичних очікувань) користується t -критерій Стюдента (t -критерій відмінності). Критерій дозволяє знайти ймовірність того, що обидва середні відносяться до однієї і тієї ж сукупності. Якщо ця ймовірність P нижче рівня значимості ($p<0,05$), прийнято вважати, що вибірки відносяться до двох різних сукупностей.

Критерій достовірності розрахованого коефіцієнта кореляції Пірсона визначають за формулою:

$$t_r = \frac{r_{xy}}{m_r}. \quad (7)$$

Отриманий критерій t_r оцінюється за таблицею критичних значень t -критерію Стюдента при різних рівнях значущості (p) з урахуванням числа ступенів свободи $v=n-2$. Таким чином, табличне значення t -критерію Стюдента залежить і від довірчої ймовірності, і від кількості факторів, і від довжини вихідного статистичного ряду. Якщо розрахована величина критерію достовірності t_r перевищує табличне значення або принаймні дорівнює йому ($t_r \geq t_{st}$), то основну (нульову) гіпотезу відкидають і вважають, що з ймовірністю $(1-p)$ параметр або статистична характеристика в генеральній сукупності значно відрізняється від нуля, тобто взаємозв'язок між ознаками статистично значущий. Якщо фактичне значення t_r менше табличного ($t_r < t_{st}$), немає підстав відкидати основну (нульову) гіпотезу, тобто параметр або статистична характеристика в генеральній сукупності незначно відрізняється від нуля при рівні значущості p , тобто взаємозв'язок між ознаками відсутній. Чим менший рівень значущості, тим більша достовірність, тобто $0,001 < 0,01 < 0,05$.

Коефіцієнт кореляції визнається надійним із довірчою ймовірністю понад 95%.

Результатом кореляційного аналізу є побудова матриці, в якій записано коефіцієнти кореляції Пірсона, що характеризують взаємозв'язки однієї ознаки з іншою. Зручніше таку матрицю подати у вигляді таблиці, заголовками рядків і стовпців якої є змінні, що обробляються, а на перетині рядків і стовпців виводяться коефіцієнти кореляції для відповідної пари ознак. Аналогічним чином будується матриця у вигляді таблиці, в якій записано критерії достовірності отриманих значень коефіцієнтів кореляції Пірсона.

Результати дослідження

Річка Самара відноситься до середніх річок Наддніпрянщини (рис. 1). Більша частина Самари протікає територією Дніпропетровської області (187 км). Самара є притокою I порядку річки Дніпро, яка впадає в Дніпровське водосховище в районі міста Дніпро.

Сучасний стан басейну річки Самара обумовлений тривалим та інтенсивним впливом антропогенних факторів. Масштабний вплив на екологічний стан водного об'єкта триває вже понад 80 років. Перші зміни якісних та кількісних характеристик річкової системи відбулися після спорудження ДніпроГЕС та Дніпровського водосховища. Надалі антропогенний вплив на компоненти всієї екосистеми річки Самара зумовлений інтенсивним розвитком промисловості та сільського господарства. Наступним фактором, який суттєво вплинув на подальше існування всіх складових екосистеми річки, був процес вуглевидобутку (видобуток вугілля супроводжується скидом мінералізованих шахтних вод у заплаву річки Самара). Особливо інтенсивно цей процес почав проявлятися з першої половини 1970-х років XX століття. До того ж з середини 50-х років XX століття річка Самара почала приймати через свої притоки (річка Вовча) шахтні води Центрального Донбасу.

При дослідженні причинно-наслідкового взаємозв'язку між станом забруднення поверхневих вод річки Самара та класами захворюваності населення, що мешкає на території Західно-Донбаського регіону, використовувалися статистичні дані Державної служби статистики України і Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України за період 2011-2022 роки.

1. Скид забруднених зворотних вод у поверхневий водний об'єкт, млн м³.
2. Вміст сульфатів у поверхневих водах річки Самара, тис. тонн.
3. Вміст хлоридів у поверхневих водах річки Самара, тис. тонн.
4. Вміст сухого залишку в поверхневих водах річки, тис. тонн.
5. Вміст завислих речовин у поверхневих водах річки Самара, тис. тонн.
6. Вміст заліза в поверхневих водах річки Самара, тонни.
7. Вміст міді в поверхневих водах річки Самара, тонни.
8. Вміст цинку в поверхневих водах річки Самара, тонни.
9. Вміст нікелю в поверхневих водах річки Самара, тонни.
10. Вміст хрому в поверхневих водах річки Самара, тонни.
11. Вміст марганцю в поверхневих водах річки Самара, тонни.
12. Вміст свинцю в поверхневих водах річки Самара, тонни.

13. Показник БСК (біологічного споживання кисню) в поверхневих водах річки Самара, тис. тонн.

14. Вміст нафтопродуктів у поверхневих водах річки Самара, тонни.

В якості *Y*-залежних факторів, що змінюються під дією *X*-незалежних, обрано наступні класи захворювань населення (кількість випадків захворювань в розрахунку на 100000 населення), що мешкає на території Західно-Донбаського регіону:

A. Новоутворення.

B. Хвороби крові, кровотворних органів та окремі порушення із залученням імунного механізму.

C. Хвороби ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин.

D. Хвороби системи кровообігу.

E. Хвороби органів травлення.

F. Хвороби шкіри та підшкірної клітковини.

G. Хвороби кістково-м'язової системи та сполучної тканини.

I. Хвороби сечостатевої системи.

J. Вроджені аномалії (вади розвитку), деформації та хромосомні порушення.

K. Окремі стани, що виникають у перинатальному періоді (захворюваність дітей віком до одного року).

Коефіцієнт кореляції Пірсона розраховувався за формулами (1)-(5). Результати встановлення причинно-наслідкового взаємозв'язку між якістю поверхневих вод річки Самара та станом здоров'я населення, що мешкає на території Західно-Донбаського регіону, наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Результати розрахунку коефіцієнтів кореляції якості поверхневих вод річки Самара та стану здоров'я населення, що мешкає на території Західно-Донбаського регіону

Показники*	Класи хвороб, відповідно до прийнятої літери									
	A	B	C	D	E	F	G	I	J	K
1	0,51	0,85	0,78	0,74	0,80	0,82	-0,01	0,549	-0,39	0,69
2	0,72	0,68	0,69	0,83	0,73	0,37	0,44	0,109	-0,01	0,81
3	0,52	0,36	0,70	0,66	0,36	0,47	0,13	-0,02	0,081	0,42
4	0,71	0,66	0,70	0,86	0,71	0,40	0,41	0,085	0,048	0,77
5	0,64	0,71	0,71	0,89	0,73	0,48	0,33	0,128	0,005	0,74
6	0,64	0,71	0,73	0,92	0,75	0,46	0,28	0,189	-0,03	0,74
7	0,34	0,82	0,78	0,78	0,73	0,86	-0,12	0,498	-0,37	0,55
8	0,86	0,55	0,48	0,61	0,67	0,36	0,39	0,213	0,006	0,79
9	0,53	0,70	0,72	0,88	0,68	0,65	-0,01	0,317	-0,12	0,58
10	0,24	0,83	0,65	0,32	0,64	0,79	-0,25	0,678	0,783	0,54
11	0,83	0,62	0,63	0,81	0,79	0,20	0,55	0,156	0,030	0,91
12	0,26	0,82	0,22	0,69	0,74	0,80	-0,28	0,642	-0,26	0,41
13	0,61	0,85	0,76	0,86	0,86	0,67	0,18	0,422	0,241	0,80
14	0,41	0,76	0,73	0,81	0,66	0,77	0,042	0,268	-0,17	0,56

Примітки: *Показники, що характеризують якісно-кількісний стан поверхневих вод річки Самара, відповідно до порядкового номеру

Прийнято основну (нульову) гіпотезу – взаємозв'язок між якістю поверхневих вод річки Самара та станом здоров'я населення, що мешкає на території Західно-Донбаського регіону, відсутній, тобто досліджувані параметри незначно відрізняються від нуля при рівні значущості p . Під альтернативною (конкуруючою) гіпотезою мається на увазі, що досліджувані параметри значно відрізняються від нуля, тобто взаємозв'язок між ознаками є статистично значущим.

Для підтвердження або спростування нульової гіпотези розраховано критерії достовірності визначених коефіцієнтів кореляції Пірсона за формулами (6)-(7). Результати розрахунку критеріїв достовірності отриманих значень коефіцієнтів кореляції якості поверхневих вод річки Самара та стану здоров'я населення, що мешкає на території Західно-Донбаського регіону, наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Результати розрахунку критеріїв достовірності отриманих значень коефіцієнтів кореляції якості поверхневих вод річки Самара та стану здоров'я населення, що мешкає на території Західно-Донбаського регіону

Показники*	Класи хвороб, відповідно до прийнятої літери									
	A	B	C	D	E	F	G	I	J	K
1	1,43	3,95	3,00	2,69	3,27	3,54	0,02	1,53	1,05	2,36
2	2,53	2,28	2,32	3,62	2,62	0,97	1,18	0,27	0	3,4
3	1,50	0,95	2,43	2,16	0,93	1,32	0,32	0,04	0,20	1,15
4	2,47	2,12	2,41	4,20	2,46	1,07	1,10	0,21	0,12	2,98
5	2,04	2,45	2,47	4,78	2,58	1,32	0,87	0,32	0,01	2,69
6	2,02	2,49	2,62	5,88	2,74	1,27	0,71	0,47	0,08	2,68
7	0,87	3,55	3,03	3,00	2,63	4,20	0,30	1,41	0,98	1,63
8	4,07	1,60	1,35	1,89	2,20	0,95	1,05	0,53	0,02	3,17
9	1,54	2,38	2,51	4,59	2,25	2,11	0	0,82	0,29	1,76
10	0,60	3,62	2,09	0,82	2,01	3,20	0,64	2,26	3,08	1,58
11	3,66	1,96	1,98	3,41	3,17	0,50	1,63	0,39	0,07	5,15
12	0,66	3,52	0,56	2,34	2,70	3,21	0,72	2,05	0,66	1,11
13	1,91	3,90	2,86	4,13	4,18	2,18	0,46	1,14	0,61	3,21
14	1,09	2,86	2,61	3,32	2,17	2,93	0,10	0,68	0,41	1,65

Примітки: *Показники, що характеризують якісно-кількісний стан поверхневих вод річки Самара, відповідно до порядкового номеру

Отримані критерії достовірності оцінюються за таблицею критичних значень t -критерію Стюдента при рівнях значущості (p) 0,05, 0,01 та 0,001 з урахуванням числа ступенів свободи, що дорівнює $\nu=n-2=10-2=8$. Значення t -критерію Стюдента для 5%- , 1%- та 0,1%-го рівня значущості для числа ступенів свободи $\nu=8$ наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Критичні значення t -критерію Стюдента для 5%- , 1%- та 0,1%-го рівня значущості для числа ступенів свободи $\nu=8$ [21]

Межі значень		
$p=0,05$	$p=0,01$	$p=0,001$
$t_{st}>2,31$	$t_{st}>3,36$	$t_{st}>5,04$

Найбільш пов'язаними з якістю води (скид забруднених зворотних вод у поверхневий водний об'єкт) виявилися наступні класи захворювань:

- хвороби крові, кровотворних органів та окремі порушення із залученням імунного механізму;
- хвороби ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин;
- хвороби системи кровообігу;
- хвороби органів травлення;
- хвороби шкіри та підшкірної клітковини.

Саме між цими досліджуваними параметрами спостерігається «сильний» позитивний зв'язок ($0,701 < |r_{xy}| < 0,900$). Тобто чим більше в поверхневій воді річки Самара скидається забруднених або недостатньо очищених стічних вод, тим більше випадків захворювання на вище зазначені класи хвороб реєструється лікарями. При цьому критерії достовірності отриманих величин коефіцієнтів кореляції перевищують табличне значення t -критерію Стюдента для числа ступенів свободи $\nu=8$. Це свідчить про те, що прийнята нульова гіпотеза спростовується і приймається альтернативна, тобто зв'язок між якісним складом поверхневих вод річки Самара та рівнем захворюваності на хвороби ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин, системи кровообігу та органів травлення з довірчою ймовірністю 95% вважається статистично значущим. Між якісним складом поверхневих вод річки Самара та хворобами шкіри та підшкірної клітковини, крові, кровотворних органів та окремими порушеннями із залученням імунного механізму довірна ймовірність складає 99%. Крім того, зв'язок між якісним складом поверхневих вод річки Самара та окремими станами, що виникають у перинатальному періоді, оцінюється як «середньої сили» ($0,501 < |r_{xy}| < 0,700$), але критерій достовірності отриманого коефіцієнта кореляції перевищує табличне значення t -критерію Стюдента для $p=0,05$ рівня значущості, що дозволяє стверджувати, що зв'язок між досліджуваними параметрами з довірчою ймовірністю 95% вважається статистично значущим.

Наслідками підвищення вмісту сульфатів у поверхневих водах річки Самара є збільшення рівня захворюваності на новоутворення, хвороби системи кровообігу та органів травлення, окремі стани, що виникають у перинатальному періоді.

Підвищення вмісту хлоридів у поверхневих водах річки Самара збільшує кількість захворювань ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин.

Підвищення рівня мінералізації (сухого залишку) в поверхневих водах річки Самара збільшує кількість захворювань на новоутворення; хвороби ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин; хвороби системи кровообігу; органів травлення; окремі стани, що виникають у перинатальному періоді.

Наслідками підвищення вмісту завислих речовин у поверхневих водах річки Самара є збільшення рівня захворюваності на хвороби крові, кровотворних органів та окремі порушення із залученням імунного механізму; ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин; системи кровообігу; органів травлення; окремі стани, що виникають у перинатальному періоді.

Підвищення вмісту заліза в поверхневих водах річки Самара збільшує кількість захворювань на хвороби крові, кровотворних органів та окремі порушення із залученням імунного механізму; ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин; системи кровообігу; органів травлення; окремі стани, що виникають у перинатальному періоді.

Наслідками підвищення вмісту міді в поверхневих водах річки Самара є збільшення рівня захворюваності на хвороби крові, кровотворних органів та окремі порушення із залученням імунного механізму; ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин; системи кровообігу; органів травлення; шкіри та підшкірної клітковини.

Підвищення вмісту цинку в поверхневих водах річки Самара призводить до збільшення рівня захворюваності на новоутворення та окремі стани, що виникають у перинатальному періоді.

Наслідками підвищення вмісту нікелю в поверхневих водах річки Самара є збільшення рівня захворюваності на хвороби системи кровообігу та ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин.

Підвищення вмісту хрому в поверхневих водах річки Самара призводить до збільшення рівня захворюваності на хвороби крові, кровотворних органів та окремі порушення із залученням імунного механізму; шкіри та підшкірної клітковини; вроджені аномалії (вади розвитку), деформації та хромосомні порушення.

Підвищення вмісту марганцю в поверхневих водах річки Самара збільшує кількість захворювань на новоутворення, системи кровообігу та органів травлення, окремі стани, що виникають у перинатальному періоді.

Наслідками підвищення вмісту свинцю в поверхневих водах річки Самара є збільшення рівня захворюваності на хвороби крові, кровотворних органів та окремі порушення із залученням імунного механізму; органів травлення; шкіри та підшкірної клітковини.

Підвищення показника БСК в поверхневих водах річки Самара призводить до збільшення рівня захворюваності на хвороби крові, кровотворних органів та окремі порушення із залученням імунного механізму; ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин; системи кровообігу; органів травлення; окремі стани, що виникають у перинатальному періоді.

Наслідками підвищення вмісту нафтопродуктів у поверхневих водах річки Самара є збільшення рівня захворюваності на хвороби крові, кровотворних органів та окремі порушення із залученням імунного механізму; системи кровообігу; ендокринної системи, розлади харчування, порушення обміну речовин; шкіри та підшкірної клітковини.

Таким чином, з великою часткою вірогідності можна стверджувати, що незадовільна якість поверхневих вод річки Самара призводить до захворювань населення, послаблення імунітету і, можливо, підвищення смертності мешканців Західно-Донбаського регіону.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Антропогенний вплив на водні екосистеми басейну річки Самара призводить не лише до їхнього кількісного виснаження, але й до деградації якісного складу природних вод. Це пов'язано з надмірними обсягами скиду стічних вод, різним ступенем їхнього очищення та якістю.

В даний час для досліджуваного регіону характерним є високий ступінь мінералізації та погіршення якості поверхневих вод, а це, в свою чергу, може завдати шкоди наземним агроекосистемам, оскільки ці води використовуються для поливу, та здоров'ю населення.

Аналіз даних статистики щодо якісно-кількісного стану поверхневих вод річки Самара та захворюваності населення, що мешкає на території Західно-Донбаського регіону, дозволяє з високою часткою вірогідності припустити прямий зв'язок між збільшенням певних класів захворювань мешканців даної території та наявністю забруднюючих речовин у досліджуваній водоймі.

Проблема впливу різних факторів навколишнього природного середовища як антропогенного, так і природного походження на екологічну ситуацію, що склалася на території Західно-Донбаського регіону, трудові ресурси та здоров'я людини є сьогодні однією з найактуальніших, що має величезне соціально-економічне значення.

Медико-екологічні проблеми в Україні є дуже гострими і потребують постійного спостереження за впливом довкілля на стан здоров'я населення країни з визначенням пріоритетних факторів, що формують здоров'я, і на цій основі – розробки науково-обґрунтованих оздоровчих заходів, у тому числі й природоохоронних. У зв'язку з цим ще гостріше постає проблема розробки та впровадження медико-екологічного моніторингу, метою якого буде створення на території Західно-Донбаського регіону моніторингової мережі спостереження за якістю довкілля та встановлення причинно-наслідкового взаємозв'язку між ними. На підставі отриманих даних у майбутньому буде можлива розробка оперативної системи природоохоронних заходів та заходів щодо збереження здоров'я.

Дані висновки вказують на необхідність проведення в подальшому більш глибоких досліджень для коректування нормативів якості поверхневих вод з урахуванням регіональної специфіки умов і факторів забруднення навколишнього середовища, розробки більш досконалих систем водопідготовки для зниження рівня захворюваності населення, що мешкає на прилеглих територіях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Tiwary, R. K. (2001). Environmental Impact of Coal Mining on Water Regime and Its Management. *Water, Air, & Soil Pollution*, 132, 185-199. doi: 10.1023/A:1012083519667
2. Ray, S. & Dey, K. (2020). Coal Mine Water Drainage: The Current Status and Challenges. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 101, 165-172. doi: <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00222-5>
3. Singh, G. (1988). Impact of coal mining on mine water quality. *International Journal of Mine Water*, 7, 49-59. doi: <https://doi.org/10.1007/BFO2504598>
4. Bian, Z., Jnyang, H. J., Daniels, J. L., Otto, F. & Struthers, S. (2010). Environmental issues from coal mining and their solutions. *Mining Science and Technology (China)*, 20(2), 215-223. doi: [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60187-3](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60187-3)
5. Dutta, D., Arya, S & Kumar, S. (2021). Industrial wastewater treatment: Current trends, bottlenecks, and best practices. *Chemosphere*, 285, 131245. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131245>
6. Jhansi, S. C. & Mishra, S. K. (2013). Wastewater treatment and reuse: Sustainability options. *Consilience*, 10, 1-15.
7. Kesari, K. K., Soni, R., Jamal, Q. M. S., Tripathi, P., et al. (2021). Wastewater Treatment and Reuse: a Review of its Applications and Health Implications. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 208. doi: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154-8>

8. Khan, S. A., Ponce, P., Yu, Z., Golpir, H. & Mathew, M. (2022). Environmental technology and wastewater treatment: Strategies to achieve environmental sustainability. *Chemosphere*, 286, 131532. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131532>
9. Muga, H. E. & Mihelcic, J. R. (2008). Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, 88(3), 437-447. doi: 10.1016/j.jenvman.2007.03.008
10. Yadav, M., Gupta, R. & Sharma, R. K. (2019). Green and sustainable pathways for wastewater purification. In *Advances in Water Purification Techniques*, 355-383. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814790-0.00014-4>
11. Van der Bruggen, B. (2021). Sustainable implementation of innovative technologies for water purification. *Nature Reviews Chemistry*, 5, 217-218. doi: 10.1038/s41570-021-00264-7
12. Jin, L., Zhang, G. & Tian, H. (2014). Current state of sewage treatment in China. *Water Research*, 66, 85-98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.014>
13. Rashid, R., Shiq, I., Akhter, P., Iqbal, M. J. & Hussain, M. (2021). A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: The effectiveness of adsorption method. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 9050-9066. doi: 10.1007/s11356-021-12395-x
14. Silva, J. A. (2023). Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 15(14), 10940. doi: <https://doi.org/10.3390/su151410940>
15. Kurnaz, A. & Aydin, M. (2018). Radon and heavy metal risk assessments of drinking water sources. *Desalination and Water Treatment*, 130, 194-199. doi: 10.5004/dwt.2018.23009
16. Liu, Q., Han, W., Han, B., Shu, M. & Shi, B. (2018). Assessment of heavy metals in loose deposits in drinking water distribution system. *Environmental Monitoring & Assessment*, 190, 388. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6761-9>
17. Singhal, A. (2021). Heavy metals in drinking water and their impact on human health. *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, 11(11), 586-591. doi: <https://doi.org/10.5958/2249-7315.2021.00270.7>
18. Dahiya, V. (2022). Heavy metal toxicity of drinking water: A silent killer. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 19(01), 020-025. doi: 10.30574/gscbps.2022.19.1.0107
19. Kulikova, D. V. & Pavlychenko, A. V. (2016). Estimation of ecological state of surface water bodies in coal mining regions as based on the complex of hydrochemical indicators. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 62-70.
20. Kulikova, D., Kovrov, O., Buchavy, Y. & Fedotov, V. (2018). GIS-based Assessment of the Assimilative Capacity of Rivers in Dnipropetrovsk Region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 27(2), 274-285.
21. Fisher, R. A. (2006). *Study Guides: Statistical Methods for Research Workers* New Delhi: Cosmo Publication.

Стаття надійшла до редакції 03.04.2025 і прийнята до друку після рецензування 17.07.2025

The article was received 03.04.2025 and was accepted after revision 17.07.2025

Ковров Олександр Станіславович

доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Адреса робоча: просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0782-7767> **e-mail:** kovrov.o.s@nmu.one

Кулікова Дар'я Володимирівна

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Адреса робоча: просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0874-0188> **e-mail:** kulikova.d.v@nmu.one

UDK 628.3:712.3

Kostiantyn Shumbar, Postgraduate student of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety

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

Tetiana Tkachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** tkachenko.tm@knuba.edu.ua

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ACOUSTIC EFFICIENCY OF GREEN FACADES: EVALUATION OF THE IMPACT OF *PARTHENOCISSUS QUINQUEFOLIA* ON NOISE POLLUTION REDUCTION

Abstract. *The article presents the results of a study of the acoustic efficiency of a green facade formed with Parthenocissus quinquefolia as a natural noise-absorbing barrier in an urban environment. The relevance of the work is due to the growing level of noise pollution, which is one of the leading environmental risk factors in cities. The potential of vertical gardening as an element of sustainable architectural design that combines aesthetic appeal with environmental and functional benefits is investigated. The aim of the study was to quantify the ability of a green facade formed by Parthenocissus quinquefolia to reduce sound pressure levels in the external and internal environment of a residential building. The experimental part was carried out by means of full-scale modelling of a facade fragment in two seasonal states - with and without the existing leaf cover. Acoustic measurements were performed in accordance with the requirements of DSTU B V.2.6-86:2009 under controlled conditions. Additionally, numerical modelling of wave propagation was applied, taking into account changes in the effective density and elastic properties of the medium. The results of the study show that the leaves of Parthenocissus quinquefolia reduce the sound pressure level by up to 20 dB in the mid-frequency range. Even in the absence of leaf cover, a pronounced noise-protective effect is maintained, which confirms the feasibility of using this plant for vertical gardening in the context of reducing noise load. The obtained results deepen the understanding of the acoustic properties of green facades and emphasise the feasibility of their use in the environmentally oriented design of urban spaces.*

Keywords: *green façades; Parthenocissus quinquefolia; noise protection; acoustic efficiency; vertical greening; urban environment; sustainable development; ecological architecture.*

К.В. Шумбар, Т.М. Ткаченко

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

АКУСТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗЕЛЕНИХ ФАСАДІВ: ОЦІНКА ВПЛИВУ *PARTHENOCISSUS QUINQUEFOLIA* НА ЗМЕНШЕННЯ ШУМОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Анотація. *У статті представлено результати дослідження акустичної ефективності зеленого фасаду, сформованого за участю Parthenocissus quinquefolia, як природного шумопоглинального бар'єра в умовах урбанізованого середовища. Актуальність роботи зумовлена зростанням*

рівня шумового забруднення, що належить до провідних екологічних факторів ризику у містах. Досліджено потенціал вертикального озеленення як елементу сталого архітектурного проєктування, який поєднує естетичну привабливість із екологічними та функціональними перевагами. Метою дослідження було кількісне оцінювання здатності зеленого фасаду, утвореного *Parthenocissus quinquefolia*, знижувати рівень звукового тиску у зовнішньому та внутрішньому середовищі житлової будівлі. Експериментальна частина реалізована шляхом натурного моделювання фрагмента фасаду у двох сезонних станах – із наявним листковим покривом та без нього. Акустичні вимірювання виконано відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.6-86:2009 у контрольованих умовах. Додатково застосовано чисельне моделювання хвильового поширення з урахуванням змін ефективної густини та пружних властивостей середовища. Результати дослідження свідчать, що листя *Parthenocissus quinquefolia* забезпечує зменшення рівня звукового тиску до 20 дБ у середньочастотному діапазоні. Навіть за відсутності листкового покриву зберігається виражений шумозахисний ефект, що підтверджує доцільність використання цієї рослини для вертикального озеленення в контексті зниження шумового навантаження. Отримані результати поглиблюють уявлення про акустичні властивості зелених фасадів і підкреслюють доцільність їх застосування в екологічно орієнтованому проєктуванні міських просторів.

Ключові слова: зелені фасади; *Parthenocissus quinquefolia*; шумозахист; акустична ефективність; вертикальне озеленення; урбаністичне середовище; сталий розвиток; екологічна архітектура.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.153-162>

Вступ

Інтенсивна урбанізація, що супроводжується зростанням транспортного потоку та розширенням інженерної інфраструктури, зумовлює низку екологічних проблем, серед яких однією із найактуальніших є шумове забруднення [1]. Основними джерелами шуму в міському середовищі виступають автомобільний, залізничний і повітряний транспорт, а також промислові об'єкти. Надмірний рівень шуму чинить негативний вплив на стан довкілля та здоров'я населення, зокрема спричиняє стрес, розлади сну, зниження когнітивної працездатності та загального самопочуття [2]. За класифікацією Всесвітньої організації охорони здоров'я, шум є другим за значущістю екологічним фактором ризику після забруднення атмосферного повітря [3].

Традиційні методи шумозахисту, зокрема звукоізоляційні матеріали, шумозахисні екрани та оптимізація міської інфраструктури, характеризуються високою вартістю та складністю впровадження. Ефективною альтернативою зниження шумового забруднення є зелені конструкції, зокрема зелені стіни та дахи, які поєднують екологічну ефективність із шумопоглинальними властивостями рослинного покриву, сприяючи природному зниженню рівня шуму [4]. Зелені конструкції в урбанізованому середовищі забезпечують широкий спектр екосистемних послуг, включаючи підтримку біорізноманіття, регулювання водного стоку, підвищення енергоефективності будівель, зниження інтенсивності міського теплового острова, уловлювання зважених часток, покращення якості повітря та зменшення рівня шумового забруднення. Ці переваги є важливими для адаптації до зміни клімату та пом'якшення

наслідків урбанізації в містах [5]. Окрім цих екологічних аспектів, дослідження підкреслюють потенціал зелених конструкцій у покращенні акустичних умов як на вулицях, так і в приміщеннях.

У контексті зростаючих екологічних викликів, що супроводжують урбанізацію, зростає потреба у впровадженні ефективних рішень. Однією з ключових тенденцій сучасного архітектурного проектування є орієнтація на принципи сталого будівництва, спрямовані на мінімізацію негативного впливу на довкілля та підвищення рівня комфорту для людини. Для об'єктивної оцінки екологічності будівель розроблено низку міжнародних рейтингових систем, зокрема LEED (США), BREEAM (Велика Британія), DGNB (Німеччина) тощо. Ці системи ґрунтуються на сукупності кількісних і якісних показників, що охоплюють характеристики енергоефективності, екологічної безпеки, якості внутрішнього мікроклімату та експлуатаційної ефективності. Застосування таких стандартів не лише сприяє раціональному використанню ресурсів, а й забезпечує економічну доцільність протягом життєвого циклу будівлі.

У цьому контексті особливу увагу заслуговує застосування зелених фасадів – систем вертикального озеленення, які поєднують естетичну привабливість із функціональними властивостями, зокрема здатністю знижувати рівень шумового забруднення. Представлене дослідження спрямоване на оцінку акустичної ефективності озеленення фасаду за допомогою *Parthenocissus quinquefolia* (дикий виноград п'ятилистий) як природного шумозахисного елемента в умовах міського середовища [6].

Використання систем вертикального озеленення фасадів розглядається як ефективний інструмент сталого будівництва, що сприяє покращенню мікрокліматичних умов навколо будівель та водночас знижує рівень шуму як зовні, так і всередині приміщень [7]. Зелені фасади, реалізовані у формі фасадних або живих стін, здатні ефективно поглинати та розсіювати звукові хвилі, зменшуючи акустичне навантаження на навколишнє середовище. Дослідження показують, що залежно від типу вертикального озеленення, густоти рослинного покриву та сезонного стану листя, зниження шуму може досягати 10–20 дБ, особливо в середньочастотному діапазоні [8].

Завдяки рослинному покриву на зелених фасадах відбувається ефективне розсіювання та відбиття звукових хвиль, що сприяє створенню комфортного акустичного середовища. Одне з досліджень показало, що зелені стіни здатні знижувати рівень шуму в навколишньому середовищі до 10 децибел, що значно перевищує ефективність традиційних матеріалів, таких як бетон чи скло [9]. Акустична ефективність зелених стін залежить від ряду факторів, включаючи видовий склад рослин, щільність рослинності та характеристики субстрату. Подальші дослідження підтверджують ефективність зелених стін як звукопоглинальних елементів, зазначаючи, що оптимальні параметри субстрату та рослинних конфігурацій можуть забезпечити коефіцієнти звукопоглинання, що перевищують 0,60 [10].

У внутрішніх приміщеннях вертикальне озеленення також надає значні акустичні переваги. Дослідження показали, що зелені стіни в закритих просторах можуть знижувати час реверберації в середньочастотному діапазоні, що значно покращує розбірливість мови [11]. Крім того, вертикальні сади в приміщеннях здатні поглинати до 70% звукової енергії на певних частотах, ефективно зменшуючи шум, що виникає від офісного обладнання та повсякденної діяльності [12]. Особливу увагу привертають дослідження, які

зосереджуються на визначенні коефіцієнтів звукопоглинання зелених стін. Більшість таких досліджень проводиться в лабораторних умовах з використанням імпедансних труб або ревербераційних камер, що дозволяє детально аналізувати внесок окремих компонентів системи, таких як листя, стебла та субстрат. Водночас спостерігається зростання інтересу до оцінки акустичної ефективності зелених фасадів у реальних міських умовах [6, 13, 14].

Дослідження показують, що міська рослинність позитивно впливає на здоров'я людини, зокрема через зменшення рівня шумового забруднення [15]. Вертикальне озеленення ефективно знижує рівень шуму в урбанізованому середовищі завдяки здатності поглинати та розсіювати звукові хвилі. Огляд понад 40 наукових робіт показує, що ці системи особливо результативні в середньому та високочастотному діапазоні, коли конструкція не містить повітряних порожнин або резонансних елементів. Особливу увагу приділено застосуванню зелених фасадів у густозабудованих міських районах та житлових кварталах, де рівень шуму є високим [16].

Метою експериментального дослідження є кількісне оцінювання здатності зеленого фасаду з *Parthenocissus quinquefolia* знижувати рівень звукового тиску у зовнішньому та внутрішньому середовищі житлової будівлі, а також аналіз впливу різних факторів на акустичну ефективність. Особливу увагу приділено впливу листяного покриву на зменшення звукового тиску у внутрішньому просторі з метою підвищення акустичного комфорту мешканців.

Основна частина. Для оцінки шумопоглинальних властивостей рослинного покриву було проведено дослідження акустичної ефективності зелених фасадів із використанням *Parthenocissus quinquefolia*, з урахуванням сезонних змін, що є важливим внеском у формування екологічно орієнтованих архітектурних рішень, які поєднують естетику, екологічність і функціональність [16, 17].

Гіпотеза дослідження ґрунтується на припущенні, що листя *Parthenocissus quinquefolia* [16, 17] утворює природний пористий бар'єр, який здатний до розсіювання та часткового поглинання звукових хвиль. Відповідно, наявність вертикального озеленення на фасаді має сприяти зниженню рівня шуму у приміщенні порівняно з відкритим вікном без озеленення.

У межах дослідження проведено кількісне порівняння акустичних характеристик фасаду за трьох сезонних умов: з повноцінним листяним покривом, під час часткового опадання листя та за його повної відсутності. Це дозволило виявити сезонну змінність акустичних властивостей зеленого фасаду. Для досягнення мети застосовано порівняльний підхід на основі кількісного аналізу акустичних параметрів у різних умовах функціонування фасаду. Метод передбачає натурне моделювання фрагмента фасаду з варіативною зміною його структури – від повного озеленення до часткової або повної відсутності листяного покриву.

Акустичні вимірювання в межах дослідження проводилися відповідно до вимог національного стандарту ДСТУ Б В.2.6-86:2009 [18], що регламентує методи визначення звукоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій. Дотримання вимог нормативного документа забезпечило належний рівень об'єктивності результатів та їх порівнюваність, що є необхідною умовою для науково обґрунтованої оцінки акустичної ефективності зеленого фасаду як засобу шумозахисту.

З метою мінімізації впливу неконтрольованих зовнішніх чинників та підвищення достовірності експериментальних даних вимірювання проводилися в умовах контрольованого середовища – закритому приміщенні. Такий підхід дозволив усунути вплив сторонніх джерел шуму та створити стабільні параметри акустичного середовища, що сприяло отриманню точних і репрезентативних результатів.

Для реалізації експериментального дослідження акустичної ефективності зеленого фасаду з використанням *Parthenocissus quinquefolia* був виготовлений натурний макет фасаду будівлі з жорсткого матеріалу – піностерольної коробки, що імітувала фрагмент огорожувальної конструкції. Такий макет дозволив точно відтворити умови, характерні для реальних міських будівель, що сприяє кращому розумінню ефективності зелених фасадів у контексті зменшення рівня шуму в урбанізованих середовищах (рис. 1). Як джерело шуму використовувалась аудіосистема, яка відтворювала попередньо записаний урбаністичний шум з фіксованим рівнем гучності. Це забезпечило стабільність та повторюваність експериментальних умов, дозволяючи уникнути впливу змінних факторів, таких як непередбачувані зміни в рівні шуму, що могли б спотворити результати дослідження.

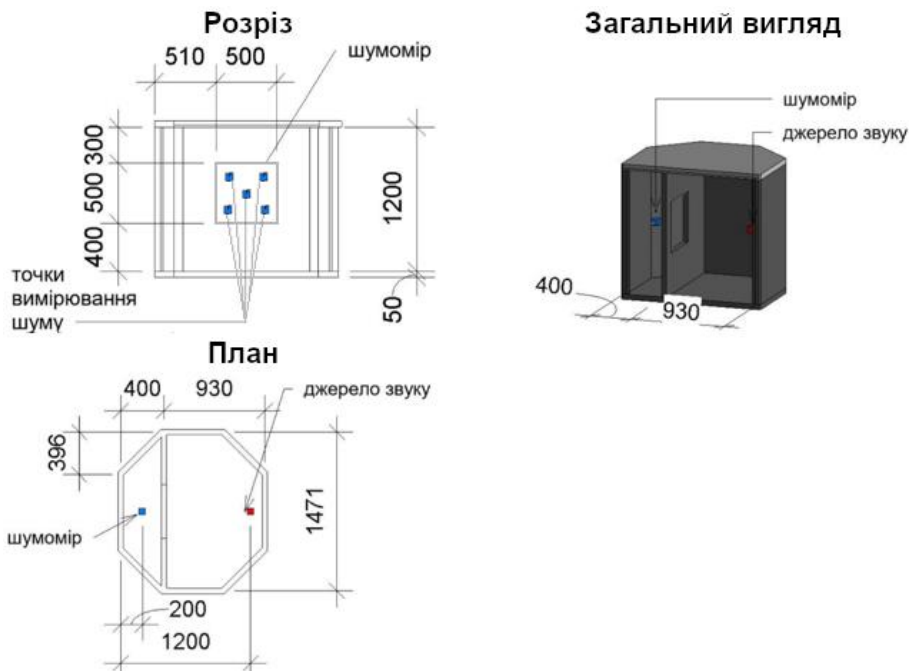


Рис. 1. Макет експериментального модуля для дослідження акустичної ефективності зеленого фасаду з використанням *Parthenocissus quinquefolia*

Під час експериментів шумомір розміщувався всередині експериментального модуля на відстані 0,2 метра від внутрішньої поверхні фасадної стіни, що дозволяло точно фіксувати рівень шуму безпосередньо поблизу фасаду. Джерело шуму розташовувалося на відстані 1,2 метра від фасаду, напроти нього, що імітувало звукове навантаження, характерне для міських умов, де джерела шуму, такі як транспорт або будівельні роботи, можуть бути розташовані на значних відстанях від будівель.

Завдяки такій конфігурації, дослідження змогло точніше моделювати умови реальних міських середовищ і оцінити ефективність зелених фасадів з рослиною *Parthenocissus quinquefolia* у зниженні рівня шуму та покращенні акустичного комфорту. Сталість експериментальних умов забезпечила отримання репрезентативних даних, що можуть бути застосовані до різних урбанізованих територій.

Експериментальна частина дослідження включала два основні етапи, кожен з яких мав на меті вивчення сезонної змінності акустичних характеристик вертикального озеленення на прикладі рослини *Parthenocissus quinquefolia*.

Етап 1. Зимова конфігурація. Фасад покривався гілками та стеблами *Parthenocissus quinquefolia* без листя, що відповідало умовам зимового або міжсезонного періоду. Такий стан дозволяв оцінити базовий рівень акустичної ефективності озеленення за відсутності листкової маси.

Етап 2. Вегетаційна конфігурація. На фасад наносився повний листковий покрив цієї ж рослини, характерний для періоду активної вегетації. Це дозволило визначити вплив щільного листяного шару на здатність системи знижувати рівень звукового тиску.

Для кожного з варіантів було виконано серію з восьми акустичних вимірювань. Дані опрацьовувалися з визначенням середніх значень рівня звукового тиску (у дБ), після чого здійснювалось порівняння результатів двох конфігурацій. Такий підхід дозволив кількісно оцінити зміну шумозахисної ефективності фасаду залежно від сезонного стану рослинного покриття.

Отримані результати становлять важливу основу для формулювання висновків щодо акустичних переваг використання *Parthenocissus quinquefolia* в системах вертикального озеленення для створення комфортного середовища в житлових будівлях протягом року.

Аналіз результатів дослідження ґрунтувався на застосуванні методів математичного моделювання процесів хвильового поширення, відбиття та розсіювання звуку в середовищі з неоднорідною структурою, сформованою елементами зеленого фасаду. Зокрема, розглядалася взаємодія звукових хвиль з пористим рослинним шаром, включаючи стебла, листя та повітряні проміжки між ними. Це дозволило оцінити вплив геометричних та фізичних характеристик рослинного покриття на зміну акустичного тиску в контрольованих умовах.

Процес загасання шуму включає кілька основних механізмів: геометричне затухання, поглинання звуку стеблами рослин та атмосферне затухання. Коефіцієнт поширення звукової хвилі через покриття *Parthenocissus quinquefolia* було визначено за формулою (1), яка описує зміну властивостей звукової хвилі при проходженні через середовище, що містить рослинні елементи цього виду, також враховує його ефективну густину ρ_{eff} та здатність матеріалу передавати коливання C_{eff} , що впливає на поширення хвиль в середовищі:

$$\frac{\Gamma}{k_0} = j \sqrt{\frac{\rho_{eff}}{\rho_0} \cdot \frac{C_{eff}}{C_0}}, \quad (1)$$

де: Γ – характеристика хвильового процесу (коефіцієнт загасання); k_0 – хвильовий вектор; j – уявна одиниця; ρ_{eff} та ρ_0 – ефективна та початкова густина, відповідно; C_{eff} та C_0 – ефективна та початкова пружність (або інший модуль, що характеризує матеріал).

Ефективна густина середовища розраховувалась з урахуванням внеску рослинних елементів, таких як стебла *Parthenocissus quinquefolia*, у зміну акустичних властивостей за рівнянням (2):

$$\frac{\rho_{eff}}{\rho_0} = 1 + j \frac{8\mu}{\pi(k_0\alpha)^2} \sum \sqrt{D_n}, \quad (2)$$

де ρ_{eff} – ефективна густина середовища, що містить елементи *Parthenocissus quinquefolia*; ρ_0 – початкова густина середовища (повітря); j – уявна одиниця; μ – параметр, що характеризує в'язкість або інші фізичні властивості середовища; k_0 – хвильовий вектор; α – розмір включень (наприклад, середній радіус рослинних елементів); $\sum \sqrt{D_n}$ – сума членів D_n , які можуть бути коефіцієнтами розсіювання або характеристиками взаємодії хвиль із середовищем.

Ефективну пружність середовища було визначено за рівнянням (3):

$$\frac{c_{eff}}{c_0} = 1 + j \frac{8\mu}{\pi(k_0\alpha)^2} (0,5D_0 + \sum \sqrt{D_n}). \quad (3)$$

Затухання шуму на одиничну довжину хвилі розраховувалось за (4):

$$(-\Delta L)\lambda_0 = 8,686 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} Re\{\Gamma\}, \quad (4)$$

де ΔL – зміна рівня втрат звукової хвилі; коефіцієнт затухання, λ_0 – довжина хвилі у вихідному середовищі; число 8,686 пов'язане з переходом від натурального логарифма до десяткового логарифма (оскільки $lg(e) \sim 0,4343$); $\frac{2\pi}{\lambda_0}$ – хвильове число у вихідному середовищі; $Re\{\Gamma\}$ – дійсна частина комплексного коефіцієнта затухання Γ , яка визначає витрати енергії при поширенні хвилі [19].

Результати експериментального дослідження показали, що рослинне покриття *Parthenocissus quinquefolia* впливає на поширення звуку через зміну ефективної густини та пружності середовища. Затухання шуму відбувається за рахунок геометричного розсіювання, поглинання енергії рослинними елементами та атмосферного затухання. В результаті середовище з рослинним покриттям знижує рівень шуму, змінюючи швидкість та інтенсивність звукових хвиль.

Покриття *Parthenocissus quinquefolia* навіть у зимовий період забезпечувало певний рівень шумозахисту, що вказує на важливість цього виду рослин для зниження акустичного навантаження в міських умовах на різних етапах року. На рисунку 2 представлені результати дослідження, які ілюструють затухання шуму в залежності від частоти для *Parthenocissus quinquefolia* з листям та без нього. Аналіз даних дозволяє зробити такі висновки:

- у літній період (коли рослина має повний листовий покрив) рівень шумопоглинання є значно вищим, особливо в діапазоні високих частот, що пояснюється щільним покриттям листя, яке ефективно поглинає та розсіює звукові хвилі;

- взимку, при відсутності листя, шумозахисні властивості покриття знижуються, але все ж залишаються значними. Це свідчить про те, що навіть без листової маси рослина зберігає свою ефективність як бар'єр для звукових хвиль завдяки своїй структурі, включаючи стебла та гілки, які частково поглинають і розсіюють звук;

- густота покриття є ключовим фактором у зменшенні рівня шуму. Чим щільніше розташовані елементи рослини (стебла, листя), тим більшу ефективність показує покриття щодо поглинання звукових хвиль. Таким чином, оптимізація густоти рослинного покриття може значно підвищити акустичну ефективність зелених фасадів.

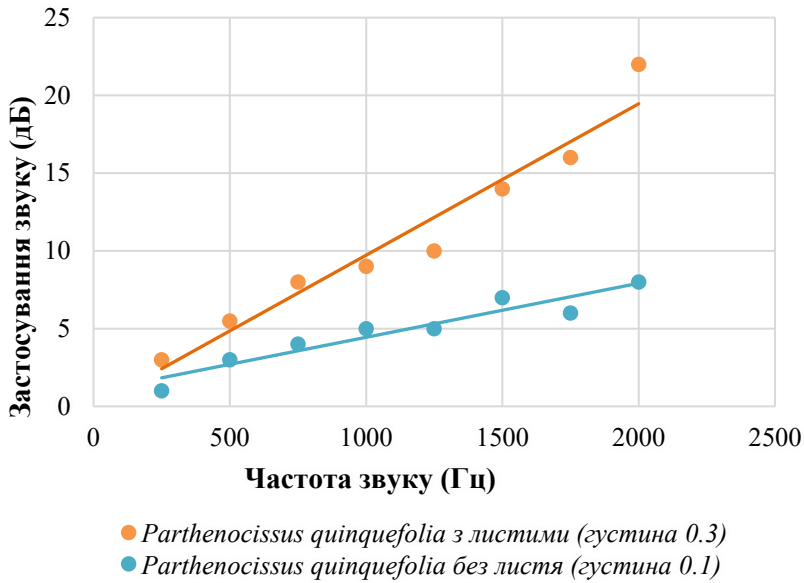


Рис. 2. Порівняння затухання шуму для *Parthenocissus quinquefolia* з листям та без нього

За результатами експерименту було зафіксовано значне зниження рівня шуму в умовах, коли макет був покритий рослиною *Parthenocissus quinquefolia*. Найбільш ефективним виявився варіант з повністю облистяним покриттям, де середнє зниження рівня шуму порівняно з відкритою поверхнею становило приблизно 20 дБ.

У конфігурації з виноградом без листя також спостерігалось зниження рівня шуму, хоча воно було менш виражене. Це підтверджує важливу роль листової маси в акустичному поглинанні та розсіюванні звукових хвиль, що, в свою чергу, підтримує гіпотезу про те, що зелені фасади можуть бути ефективними природними шумопоглинаючими бар'єрами, особливо в період активної вегетації, коли рослини мають максимальну біомасу.

Отримані результати узгоджуються з іншими науковими дослідженнями, які вказують на здатність щільної рослинності на фасадах та покрівлях будівель зменшувати акустичне навантаження на мешканців і покращувати загальний звуковий комфорт у міських умовах.

Таким чином, використання рослини *Parthenocissus quinquefolia* як елементу вертикального озеленення може стати ефективним рішенням для пасивного шумозахисту в умовах сучасної урбанізації.

Висновки

Дослідження показало, що рослинне покриття *Parthenocissus quinquefolia* суттєво знижує рівень шуму, змінюючи ефективну густину та пружність середовища, що сприяє затуханню звукових хвиль через геометричне розсіювання, поглинання енергії рослинами та атмосферне затухання. Це покриття забезпечує ефективний шумозахист навіть у зимовий період, хоча його ефективність знижується за відсутності листя. Влітку, з листям, рівень шумопоглинання є вищим, особливо на високих частотах. Густота покриття є ключовим фактором, що визначає ступінь зниження рівня шуму.

Зважаючи на те, що акустичні характеристики зелених конструкцій ще не є повністю дослідженими, подальші дослідження повинні враховувати такі аспекти, як вплив рівнів насичення субстрату, його ущільнення та складу, різних типів гідрофільних шарів і опорних систем на коефіцієнт звукопоглинання. Дослідження також повинні бути спрямовані на оптимізацію характеристик рослинного покриття для досягнення максимальної ефективності в різних кліматичних зонах. Морфологія рослин є важливим фактором, що визначає ефективність зелених конструкцій у зменшенні шуму. Краще розуміння механізмів взаємодії цих факторів із специфічними характеристиками рослин дозволить оптимізувати ці технології для контролю шуму як у зовнішньому середовищі, так і в приміщеннях. Це зробить важливий внесок у поліпшення міської акустичної екології та екологічного дизайну. Крім того, доцільно провести масштабні польові дослідження з реальними будівлями, а також дослідити інші види рослин і типи субстратів, які можуть впливати на акустичні характеристики фасадів.

Застосування таких рішень у міському середовищі може стати частиною концепції сталого розвитку, зокрема біокліматичної архітектури, яка передбачає інтеграцію природних елементів у штучно створене середовище для покращення мікроклімату, зниження енергоспоживання та забезпечення шумозахисту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Park, K.; Lee, J. (2024). Mitigating Air and Noise Pollution through Highway Capping: The Bundang-Suseo Highway Cap Project Case Study. *Environmental Pollution*, 346, 123620, doi:10.1016/j.envpol.2024.123620.
2. Arsalan, M.; Chamani, A.; Zamani-Ahmadmahooodi, R. (2024). Sustaining Tranquility in Small Urban Green Parks: A Modeling Approach to Identify Noise Pollution Contributors. *Sustainable Cities and Society*, 113, 105655, doi:10.1016/j.scs.2024.105655.
3. Schwela, D.H. (2000). The World Health Organization Guidelines for Environmental Noise. *Noise news int.*, 8, 9–22, doi:10.3397/1.3703044.
4. Ngcobo, N.; Akinradewo, O.; Mokoena, P. (2024). Evaluating the Measures to Promote Sustainable Transport Infrastructure: A Case of City of Johannesburg, South Africa. *Journal of Engineering*, 2024, 6372226, doi:10.1155/je/6372226.
5. Cosola, V.O.-D.; Navacerrada, M.Á.; Ruiz-García, L.; Olivieri, F. (2024). Evaluating the Acoustic Absorption of Modular Green Walls: Laboratory and Field Assessments Using An Impedance Gun.
6. Oquendo-Di Cosola, V.; Olivieri, F.; Ruiz-García, L. (2022). A Systematic Review of the Impact of Green Walls on Urban Comfort: Temperature Reduction and Noise Attenuation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112463, doi:10.1016/j.rser.2022.112463.

7. Shushunova, N.; Korol, E.; Luzay, E.; Shafieva, D.; Bevilacqua, P. (2022). Ensuring the Safety of Buildings by Reducing the Noise Impact through the Use of Green Wall Systems. *Energies*, 15, 8097, doi:10.3390/en15218097.
8. Connelly, M.; Hodgson, M. (2013). Experimental Investigation of the Sound Transmission of Vegetated Roofs. *Applied Acoustics*, 74, 1136–1143, doi:10.1016/j.apacoust.2013.04.003.
9. Van Renterghem, T.; Botteldooren, D.; Verheyen, K. (2012). Road Traffic Noise Shielding by Vegetation Belts of Limited Depth. *Journal of Sound and Vibration*, 331, 2404–2425, doi:10.1016/j.jsv.2012.01.006.
10. Pérez, G.; Coma, J.; Barreneche, C.; De Gracia, A.; Urrestarazu, M.; Burés, S.; Cabeza, L.F. (2016). Acoustic Insulation Capacity of Vertical Greenery Systems for Buildings. *Applied Acoustics*, 110, 218–226, doi:10.1016/j.apacoust.2016.03.040.
11. Scamoni, F.; Scrosati, C.; Depalma, M.; Barozzi, B. (2022). Experimental Evaluations of Acoustic Properties and Long-Term Analysis of a Novel Indoor Living Wall. *Journal of Building Engineering*, 47, 103890, doi:10.1016/j.jobbe.2021.103890.
12. Davis, M.J.M.; Tenpierik, M.J.; Ramírez, F.R.; Pérez, M.E. (2017). More than Just a Green Facade: The Sound Absorption Properties of a Vertical Garden with and without Plants. *Building and Environment*, 116, 64–72, doi:10.1016/j.buildenv.2017.01.010.
13. Laforteza, R.; Sanesi, G. (2019). Nature-Based Solutions: Settling the Issue of Sustainable Urbanization. *Environmental Research*, 172, 394–398, doi:10.1016/j.envres.2018.12.063.
14. Azkorra, Z.; Pérez, G.; Coma, J.; Cabeza, L.F.; Bures, S.; Álvaro, J.E.; Erkoreka, A.; Urrestarazu, M. (2015). Evaluation of Green Walls as a Passive Acoustic Insulation System for Buildings. *Applied Acoustics*, 89, 46–56, doi:10.1016/j.apacoust.2014.09.010.
15. Attal, E.; Côté, N.; Shimizu, T.; Dubus, B. (2019). Sound Absorption by Green Walls at Normal Incidence: Physical Analysis and Optimization. *Acta Acustica united with Acustica*, 105, 301–312, doi:10.3813/AAA.919313.
16. Bakker, J.; Lugten, M.; Tenpierik, M. (2023). Applying Vertical Greening Systems to Reduce Traffic Noise in Outdoor Environments: Overview of Key Design Parameters and Research Methods. *Building Acoustics*, 30, 315–338, doi:10.1177/1351010X231171028.
17. Ottelé, M. *The Green Building Envelope: Vertical Greening*; TU Delft: Delft, 2011; ISBN 978-90-90-26217-8.
18. DSTU B V.2.6-86:2009 “Constructions of buildings and structures. Sound insulation of enclosing structures. Measurement methods”. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. [ДСТУ Б В.2.6-86:2009 «Конструкції будинків і споруд. Звукоізоляція огорожувальних конструкцій. Методи вимірювання». Київ: Мінрегіонбуд України, 2010].
19. Chern, C.J.; Beutler, E. (1976). Biochemical and Electrophoretic Studies of Erythrocyte Pyridoxine Kinase in White and Black Americans. *Am J Hum Genet*, 28, 9–17.

Стаття надійшла до редакції 03.07.2025 і прийнята до друку після рецензування 11.09.2025

The article was received 03.07.2025 and was accepted after revision 11.09.2025

Шумбар Костянтин Вікторович

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

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

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

Ткаченко Тетяна Миколаївна

д.т.н., професорка, завідувачка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> e-mail: tkachenko.tm@knuba.edu.ua

УДК 678.743.22

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

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

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

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7953-3974> **e-mail:** [bereznytska.iuo@knuba.edu.ua](mailto:bereznyska.iuo@knuba.edu.ua)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

SUSTAINABLE APPROACH TO DESIGNING WINDOW PROFILES TO REDUCE ENVIRONMENTAL IMPACT

Abstract. *The article reveals the importance of sustainable product design as an important criterion in the formation of environmentally friendly and resource-efficient PVC-based building products. The study aims to determine the role of environmentally oriented design in increasing the efficiency of recycling plastic window and door profiles. Sustainable design is seen as a strategy that takes into account all stages of the product's life cycle, from raw material selection to disposal, with a focus on reducing negative environmental impact, energy efficiency, maintainability, and reusability. The article analyzes the basic principles of sustainable design, including the use of safe and renewable materials, waste minimization, energy-saving production, ease of disassembly, and recyclability. The importance of incorporating recycled PVC into profile designs and the compatibility of new materials with existing recycling systems is emphasized. It is emphasized that proper design can reduce resource consumption at the processing stages and reduce the toxic load on the environment.*

The authors paid special attention to the review of innovative solutions in materials science: PVC profiles made of fully recycled plastic, WPC composites (a combination of wood and PVC), and the promising technology of Bio-PVC based on vegetable oils. Bio-PVC, as noted in the article, is an important alternative that reduces dependence on petrochemical raw materials, reduces toxicity, and promotes integration into the circular economy.

European cases of successful implementation of recycling initiatives are analyzed: in particular, the German Rewindo project, programs in France and Poland. These examples demonstrate how legislative and infrastructural changes can create effective mechanisms for collecting and recycling PVC windows and doors. The article also emphasizes that the introduction of sustainable design is the key to meeting modern environmental standards (REACH, BREEAM, LEED) and increasing the investment attractiveness of production.

In conclusion, it is emphasized that sustainable design is not only an engineering approach, but also a strategic model for transforming the industry in line with the challenges of climate policy. It is a key factor in reducing the carbon footprint, improving environmental safety, optimizing resources and creating new opportunities in the construction industry.

Keywords: sustainable design, PVC, windows, doors, PVC profiles, recycling, recycling, sustainable development.

С.В. Кожевніков, Ю.О. Березницька

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

СТАЛИЙ ПІДХІД ДО ПРОЄКТУВАННЯ ВІКОННИХ ПРОФІЛІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ

Анотація. У статті розкривається значення сталого дизайну продукту як важливого критерію у формуванні екологічно безпечної та ресурсоефективної будівельної продукції на основі ПВХ. Дослідження спрямоване на визначення ролі екологічно орієнтованого проєктування у підвищенні ефективності ресайклінгу пластикових віконних і дверних профілів. Сталий дизайн розглядається як стратегія, яка передбачає врахування всіх етапів життєвого циклу виробу — від вибору сировини до утилізації, з акцентом на зменшення негативного впливу на довкілля, енергоефективність, ремонтпридатність і можливість повторного використання.

У межах статті проаналізовано основні принципи сталого дизайну, серед яких: застосування безпечних і відновлюваних матеріалів, мінімізація відходів, енергоощадне виробництво, легкість демонтажу, придатність до ресайклінгу. Вказано на важливість включення вторинного ПВХ у конструкції профілів та сумісність нових матеріалів з існуючими системами переробки. Підкреслено, що правильне проєктування дозволяє скоротити ресурсозатратність на етапах переробки та зменшити токсичне навантаження на навколишнє середовище.

Особливу увагу автори приділили огляду інноваційних рішень у матеріалознавстві: ПВХ профілі з повністю переробленого пластику, WPC-композити (поєднання деревини з ПВХ), а також перспективна технологія Біо-ПВХ на основі рослинних олій. Біо-ПВХ, як зазначено в статті, є важливою альтернативою, що дозволяє зменшити залежність від нафтохімічної сировини, знижує токсичність, а також сприяє інтеграції в циркулярну економіку.

Проаналізовано європейські кейси успішної реалізації ресайклінгових ініціатив: зокрема, німецький проєкт Rewindo, програми у Франції та Польщі. Ці приклади демонструють, як законодавчі та інфраструктурні зміни можуть створити ефективні механізми збирання та повторної переробки ПВХ вікон і дверей. Стаття також підкреслює, що впровадження сталого дизайну є ключем до відповідності сучасним екологічним стандартам (REACH, BREEAM, LEED) і підвищення інвестиційної привабливості виробництва.

У підсумку наголошується, що сталий дизайн — це не лише інженерний підхід, а стратегічна модель для трансформації галузі відповідно до викликів кліматичної політики. Він є ключовим чинником для зниження вуглецевого сліду, покращення екологічної безпеки, оптимізації ресурсів і формування нових можливостей у галузі будівництва.

Ключові слова: сталий дизайн, ПВХ, вікна, двері, ПВХ профілі, ресайклінг, переробка, сталий розвиток.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.163-176>

Вступ

Актуальність проблеми дослідження. У сучасних умовах зростаючого обсягу відходів з полівінілхлориду (ПВХ) особливої важливості набуває пошук ефективних екологічних рішень у сфері будівельної промисловості. ПВХ профілі, які широко використовуються у віконних та дверних системах,

мають тривалий життєвий цикл, але після вичерпання ресурсу створюють суттєве екологічне навантаження. Хоча технології ресайклінгу ПВХ вже впроваджуються, ефективність їх застосування значною мірою залежить від початкового підходу до проєктування виробу [1].

Концепція сталого дизайну передбачає розробку продуктів із урахуванням подальшого розбирання, переробки та мінімізації шкідливого впливу на довкілля. Однак у реальній практиці ці принципи часто ігноруються через технологічні або економічні бар'єри. Саме тому дослідження ролі сталого дизайну у формуванні умов для ефективного ресайклінгу ПВХ профілів є вкрай актуальним. Це дозволяє не лише знизити кількість відходів, а й зробити переробку більш економічно доцільною та екологічно безпечною [8].

В умовах переходу до циркулярної економіки та посилення екологічного законодавства в Україні та ЄС, формування нових підходів до дизайну продукції з урахуванням її подальшої утилізації є стратегічно важливим завданням.

Мета дослідження. Метою дослідження є обґрунтування ролі сталого дизайну продукту як ключового фактора підвищення ефективності ресайклінгу ПВХ профілів та зменшення їхнього негативного впливу на навколишнє середовище. Дослідження спрямоване на аналіз конструктивних рішень, що сприяють легшій утилізації, оцінку екологічних та технологічних переваг сталого дизайну, а також формування рекомендацій для впровадження принципів циркулярної економіки у виробництво та проєктування ПВХ продукції.

Об'єкт дослідження. Процеси проєктування та життєвого циклу ПВХ профілів у контексті їх подальшої переробки та впливу на довкілля.

Предмет дослідження. Концептуальні та практичні підходи до впровадження сталого дизайну в проєктування ПВХ профілів з метою підвищення ефективності їх ресайклінгу та зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище.

Виклад основного матеріалу

Для більш глибокого розуміння концепції сталого дизайну продукту як фактору, який напряду впливає на формування екологічних принципів, слід спочатку розглянути концепцію сталого розвитку в цілому та її основні принципи та тенденції.

Сталий розвиток – це концепція гармонійного поєднання економічного зростання, соціального добробуту та охорони довкілля з урахуванням потреб як нинішнього, так і майбутніх поколінь. Вона була офіційно сформульована у 1987 році в доповіді Брунтланда "Наше спільне майбутнє". У глобальному контексті основою сталого розвитку є Цілі сталого розвитку ООН (SDGs), ухвалені у 2015 році [8]. Вони охоплюють 17 ключових напрямів, серед яких: подолання бідності, чиста енергія, відповідальне споживання, боротьба зі зміною клімату та збереження біорізноманіття. У Європейському Союзі сталий розвиток є фундаментом політики. Втілюється через Європейський зелений курс (European Green Deal) [11], який передбачає перехід до кліматично нейтральної економіки до 2050 року, розвиток циркулярної економіки, екологічне сільське господарство, цифрову трансформацію та справедливий соціальний перехід. Таким чином, у Європі та

світі сталий розвиток став не лише етичною нормою, а й стратегічним напрямом політики, що формує майбутнє людства та планети. Із базових принципів світової концепції сталого розвитку нас цікавить напрямок, що стосується саме циркулярної економіки, відповідального споживання та екологічної безпеки [15].

Перейдемо тепер безпосередньо до питання, як саме дизайн продуктів може вплинути на загальне екологічне навантаження, на які фактори він впливає і які наслідки може спричинити? Розберемо поняття сталого дизайну продуктів.

Сталий дизайн продукту (Sustainable Product Design) – це методологія проектування, що не завдає шкоди навколишньому середовищу. Підхід до розробки виробів, який враховує екологічні, соціальні та економічні аспекти на всіх етапах життєвого циклу продукту – від вибору матеріалів до утилізації. При цьому враховується вплив на природу та здоров'я людини протягом усього життєвого циклу виробу. Таким чином, реалізація стосується ресурсозберігаючих виробничих процесів, тривалого терміну служби або часу застосування, а також, що для нас дуже важливо, надійної концепції переробки [23]. Розглянемо це з прикладу пластикових вікон, що виготовляються переважно з ПВХ профілів (Рис. 1).

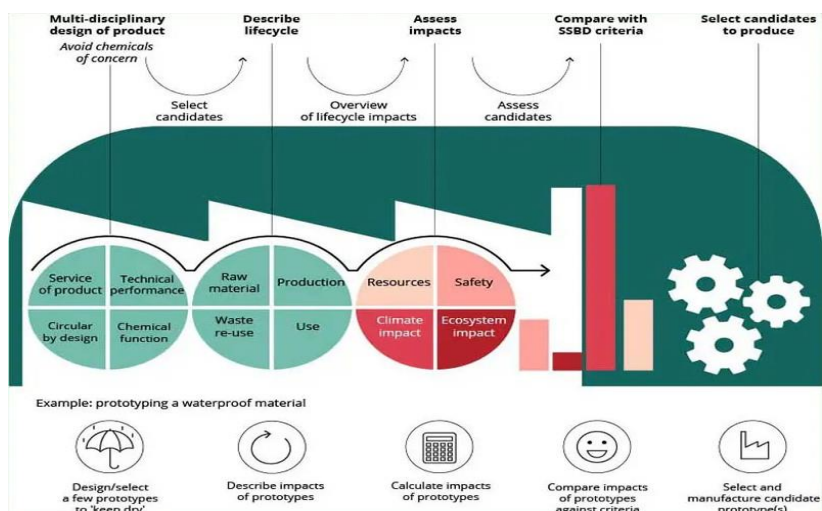


Рис. 1. Схема ресурсозберігаючих виробничих процесів [23]

Основні принципи сталого дизайну:

- використання екологічно безпечних і відновлюваних матеріалів;
- проектування для тривалого використання (довговічність, ремонтпридатність);
- мінімізація відходів при виробництві та споживанні;
- можливість повторного використання, ресайклінгу або безпечного розкладання;
- енергоефективність при виготовленні та експлуатації продукту;
- зменшення вуглецевого сліду на всіх етапах життєвого циклу.

Якщо сталий дизайн розглядати у контексті використання ПВХ профілів для їх подальшої успішної утилізації, то слід відмітити наступні важливі чинники.

Правильно спроектовані ПВХ профілі в концепції сталого дизайну мають:

- легко розбиратися для сортування матеріалів;
- містити перероблений ПВХ без втрати якості;
- містити менш токсичні добавки або замітники важких металів;
- бути сумісними з існуючими системами ресайклінгу різних типів та методів.

Такий підхід має підтримати циркулярну економіку та допомогти будівельній галузі зменшити свій вплив на довкілля. Реалізація та правильне проектування з урахуванням вторинної переробки впливає на розробку матеріалів та продуктів, тому що саме тут закладається основа для ресурсозберігаючих виробів та процесів. Зважаючи на весь життєвий цикл продукту, сценарії майбутньої переробки необхідно враховувати на етапі проектування. За словами ЕРРА [1], для пластикових вікон це велика проблема. Вікна, що використовуються сьогодні, повернуться до циклу лише через 30-40 років. Оскільки періоди повернення надто тривалі, тому ніхто не знає, чи можуть і як змінитись вимоги за цей час.

Щоб уникнути погіршення якості, прогибання та деформації, а також покращити стійкість, віконні профільні системи з ПВХ армують сталевим профілем, щоб вони могли витримувати температурні зміни, так само як і велику вагу склопакета в залежності від розміру та конструкції. Відомо, що віконні профілі без сталевго армування можуть мати ще кращі теплові властивості. Для зниження тепловтрат успішно розроблені гібридні матеріали, що не вимагають сталі. Але чи можна їх переробляти? [9].

Виробники систем спробували знайти відповідь на це питання у дослідницькому проекті. Результати даного проекту будуть проаналізовані та показані в іншому аналітичному матеріалі, але якщо зробити висновок коротко, то випробування ясно показують, що можна забезпечити придатність вікна до вторинної переробки, здійснивши відповідні кроки на етапі проектування.

Основні виклики для ресайклінгу віконних ПВХ систем. Можна впевнено стверджувати, що переробка є, мабуть, найважливішим критерієм проектування нового продукту. Для цього має бути передбачено можливість ідентифікації матеріалу або його компонентів. Це просте завдання із пластиковими вікнами, які в основному виготовляються із твердого ПВХ. Однак багато інших видів відходів рідко повертаються у розсортованому вигляді, тому сортування та очищення є важливою передумовою для якісної переробки (Рис. 2).



Рис. 2. Пластикові відходи від демонтованих ПВХ вікон

Крім того, виріб повинен бути розбірним, незалежно від того, чи він підлягає механічній або хімічній переробці. Щоб у майбутньому постачати більше продуктів ресайклінгу, необхідно координувати якість переробленого матеріалу та самого продукту. Все це важливо враховувати на етапі проектування дизайну продукту [2].

Для підтримки безперервності циркуляційних процесів потрібна рушійна сила. Очолює список ініціатив схвалення планувальників будівництва та інвесторів, які обирають будівельні продукти, що містять перероблені матеріали. Якщо законодавці, місцеві органи влади та компанії по поводженню з відходами забезпечать, щоб старі вікна перероблялися лише відповідно до ієрархії відходів, компанії, що спеціалізуються на ресайклінгу, зможуть розраховувати на достатню кількість вихідного матеріалу та виводити перероблені матеріали на ринок [16].

На рисунку 3 відображена діаграма динаміки переробки ПВХ у Європі в межах ініціативи VinylPlus з 2001 по 2023 рік. У 2023 році було перероблено 737 645 тонн ПВХ. ПВХ відходи сегментовано за категоріями: віконні профілі, труби, м'який ПВХ, підлога, кабелі та інші жорсткі ПВХ. Найбільшу частку складають віконні профілі та супутні товари, зростання обсягів спостерігається до 2020 року, після чого показники стабілізуються [2].

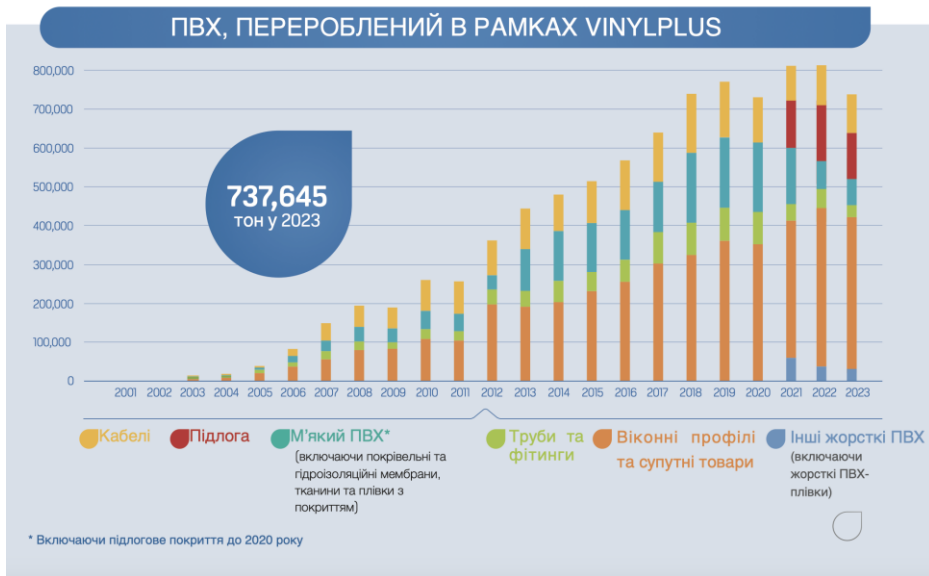


Рис. 3. Динаміка переробки ПВХ у Європі (джерело: VinylPlus)

Приклади, гідні наслідування, або які ініціативи потрібно запроваджувати в Україні, опираючись на міжнародні референси. Асоціація EPPA (European PVC Window Profile and Related Building Products Association) за сприянням VinylPlus підтримує технічні проекти зі збільшення збору та переробки пост-споживчих вікон у Німеччині, Франції та Польщі до 2025 року. Метою проектів є створення інфраструктури та сприятливого клімату для ресайклінгу ПВХ вікон за допомогою співпраці з національними асоціаціями, взаємодії з політиками та зовнішніми зацікавленими сторонами. Успіх проектів в окремих країнах видно вже сьогодні.

Німеччина. Проєкт Rewindo [13] у Німеччині було запущено понад 20 років тому з ініціативи німецьких виробників ПВХ профілів. Охоплює весь виробничо-збутовий ланцюжок віконної промисловості в сегменті пластику, сприяє збору та переробці вікон із ПВХ через організовані пункти збору та публікує інформацію про переробку вікон для зовнішніх зацікавлених сторін. Проєкт вже дуже добре реалізується завдяки розвиненій мережі та численним пунктам збору, а також заохоченню вторинного використання ПВХ, витягнутого з віконного сектора, як частини нових продуктів. Rewindo інтегрує інших партнерів у ланцюжок створення вартості (концепція Rewindo «Преміум-партнер»), піддаючи ресайклінгу не тільки ПВХ, а й скло, фурнітуру, сталеве армування і навіть ламінаційну плівку з віконних профілів.

Франція. EPPA співпрацює з UFME (Французька асоціація виробників вікон) та SnEP (Національний синдикат з екструзії пластмас) [6]. Проєкт був ініційований добровільним залученням виробничо-збутового ланцюжка до збільшення збирання вікон з ПВХ із терміном експлуатації. Весь проєкт Clearinghouse пов'язує ланцюжок створення вартості та повідомляє про зобов'язання та варіанти утилізації [5]. Обидві організації просувають принципи передової практики та використання систем збору та переробки по всій Франції. Створено інтерактивну карту центрів збору пост-споживчих вікон по всій країні. Багаторічна програма Valobat [14] по вікнах і дверях була реалізована для відповідності національним нормативним вимогам щодо фінансової підтримки збору та переробки вікон зі строком експлуатації.

Польща. Проєкт стартував у квітні 2021 року. Ініціатива на першому етапі мала стати пілотним проєктом, спрямованим на поширення інформації, знань та створення пунктів приймання, звідки старі вікна можна буде відправити на переробку. Асоціація PoID та її члени підтримали проєкт, добре розуміючи необхідність поширення інформації про проблеми демонтованих старих вікон.

Організація пунктів збору у співпраці з POiD та компаніями, що займаються вивозом сміття (шляхом створення інфраструктури для збору старих вікон у контейнери, на піддони), ідеально вписалась у програми Czyste Powietrze (Чисте повітря) та Budujesz Dla Pokoleń (Будуємо для поколінь). Ініціатива проводиться під патронатом Міністерства клімату та довкілля Польщі [7].

Практичні застосування альтернативних матеріалів ресайклінгу у віконних профільних системах. У сучасних умовах екологічних викликів та зростаючих вимог до сталого будівництва виробники віконних систем активно впроваджують інноваційні матеріали та технології. Одним із ключових напрямків є використання альтернативних ресайклінг-матеріалів у виробництві ПВХ профілів. Це дозволяє зменшити залежність від первинних ресурсів, зменшити викиди CO₂ та відповідати європейським екологічним стандартам [9].

Перероблений ПВХ (ресайклінг) – основа кругового використання. Одним з найпоширеніших матеріалів є вторинний (рецикльований) ПВХ. Його отримують шляхом механічної переробки старих вікон, дверей, труб та інших виробів із ПВХ.

У більшості випадків ПВХ ресайклінг використовується у внутрішньому шарі віконного профілю (Рис. 4), тоді як зовнішній шар виготовляється з первинного матеріалу. Така технологія коекструзії забезпечує довговічність та стійкість до погодних умов, залишаючись при цьому екологічною.

Основні переваги:

- зменшення обсягів відходів;
- зниження витрат на сировину;
- відповідність критеріям сталого будівництва (BREEAM, LEED) [6, 7];
- збереження якості при багаторазовому переробленні.

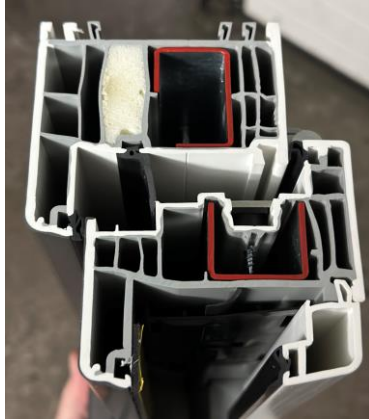


Рис. 4. Віконна ПВХ система з використанням ПВХ ресайклінгу у внутрішньому шарі

ПВХ профілі повністю з ресайклінгу: новий стандарт економії ресурсів. На ринку з'являються рішення, де весь профіль виготовлений із переробленого ПВХ [5], без шарів із первинної сировини (Рис. 5). Такі вироби часто використовуються в умовах, де немає потреби в підвищеному захисті від зовнішнього середовища — наприклад, у підсобних приміщеннях, технічних зонах або внутрішніх конструкціях.



Рис. 5. ПВХ профіль, виготовлений на 100% із ПВХ рецикляту [5]

Попри дещо нижчу атмосферостійкість, повністю рецикльовані профілі демонструють хорошу механічну міцність і значно зменшують вуглецевий слід продукції. І, звісно, такі профілі не можуть бути білого/світлого кольору, бо переважно сам рециклят має сірий відтінок, так як ПВХ переробляється разом з чорним та сірим ущільнювачем, які дають відповідний відтінок.

WPC – поєднання деревини та ПВХ у новому форматі. WPC (Wood Plastic Composite) – це композиційний матеріал, що поєднує перероблену деревину (тирсу або деревне борошно) та полімерну матрицю (найчастіше ПВХ із застосуванням клеєвих сумішей). Це дозволяє створювати естетично привабливі, міцні та довговічні вироби, які імітують текстуру натурального дерева, і у випадку зовнішнього використання залишаються стійкими до вологи, грибків і шкідників (Рис. 6) [22].



Рис. 6. Віконна профільна система з використанням рецикляту із деревини та клеєвих сумішей [22]

WPC активно використовується у:

- віконних профільних системах (внутрішній шар);
- накладках на рами;
- підвіконнях;
- фасадних елементах;
- дверних конструкціях.

Переваги WPC:

- екологічність і повторне використання матеріалів;
- зменшення деформації;
- менші витрати на догляд і обслуговування.

Біополімери та інноваційні матеріали майбутнього. У пошуках ще екологічніших рішень виробники експериментують з біополімерами, такими як: PLA (полілактидна кислота) – полімер на основі кукурудзяного крохмалю або цукрових буряків; PHA (полігідроксиалканоати) – біорозкладні матеріали, отримані з використанням бактерій. Хоча біополімери поки що не застосовуються масово в ПВХ профілях через високу вартість і обмежену довговічність, вони мають потенціал у незвичайних архітектурних рішеннях та еко-будівництві. Але все ж таки одна з біотехнологій прижилась на ринку і почала масово використовуватись.

Біо-ПВХ (Bio-PVC) з рослинних олій: екологічна альтернатива для сталого будівництва. Зростання екологічної свідомості та жорсткі європейські вимоги до токсичності будівельних матеріалів стимулюють пошук безпечніших та сталих альтернатив традиційному ПВХ. Одним із таких інноваційних рішень є

Біо-ПВХ на основі рослинних олій — матеріал нового покоління, що поєднує звичні переваги ПВХ із біологічною безпечністю та низьким вуглецевим слідом (Рис. 7) [4].



Рис. 7. ПВХ профільна система з використанням BIO PVC (не менше 15%) у комбінації з ресайклінгом (не менше 40%) та алюмінієм [4]

Що таке Біо-ПВХ з олій? Біо-ПВХ — це полівінілхлорид, у якому частина нафтохімічних компонентів замінена на відновлювані рослинні джерела. Зокрема, використовуються епоксидовані олії — з сої, ріпаку, соняшника або касторової рослини — як пластифікатори, що надають матеріалу гнучкість та еластичність без використання фталатів. Також активно використовуються як сировина різні типи відходів соняшникових, оливкових, рапсових та інших типів олій (відходи з закладів харчування та ін.). Іноді у певних випадках застосовують біоетанол з біомаси (наприклад, цукрової тростини) для заміни етилену — компонента, необхідного для синтезу ПВХ.

Технологічні особливості Біо-ПВХ:

- Пластифікація на основі природних олій забезпечує довговічність, термостійкість та еластичність матеріалу без токсичних домішок.

- Хімічна стабільність Біо-ПВХ залишається на рівні традиційного ПВХ, що дозволяє застосовувати його у зовнішніх та внутрішніх конструкціях.

- Сумісність з рециклінгом. Біо-ПВХ легко змішується з традиційним при переробці, що спрощує цикл повторного використання.

Переваги Біо-ПВХ:

- Нетоксичність: відсутність фталатів, важких металів та летких органічних сполук (VOC).

- Зниження вуглецевого сліду: заміна нафти на рослинну сировину зменшує екологічний вплив виробництва.

- Сумісність з циркулярною економікою: Біо-ПВХ придатний до повторної переробки.

- Відповідність сучасним стандартам: матеріал відповідає вимогам REACH, RoHS, BREEAM і LEED [10, 20, 8, 9].

Також є певні недоліки даної технології. По-перше, такий вид матеріалу досить дорогий і поки що сировинна база замала для використання його у великих обсягах. Але динаміка і розвиток цієї технології досить стрімка

у розвитку, і з кожним роком сировинна база збільшується, а виробники профільних віконних систем все частіше використовують даний матеріал у своєму виробництві. Іншим недоліком є досить тривалий і складний процес сертифікації виробництва, що має відповідати даній технології. Він тривалий по часу і має значну кількість вимог, що мають виконати виробники профільних систем.

Біо-ПВХ з використанням рослинних олій – це перспективний напрямок для екологізації ПВХ промисловості, в тому числі віконної індустрії. Він дозволяє зменшити токсичність, знизити залежність від нафти та інтегрувати виробництво у систему циркулярної економіки. В умовах сучасного ринку це не лише технологічне, а й репутаційне рішення для компаній, що прагнуть бути «зеленими» та відповідальними перед споживачами та природою.

Отже, інтеграція альтернативних матеріалів у виробництво віконних ПВХ профілів та інших ПВХ матеріалів є не лише трендом, а й необхідністю. Перероблений ПВХ, WPC, Біо-ПВХ та інноваційні композити – усе це демонструє готовність галузі відповідати вимогам часу та адаптуватися до глобальних кліматичних викликів. Завдяки технологічному прогресу та підтримці з боку європейських екологічних програм, віконна галузь рухається до повної циркулярності, де відходи стають ресурсом, а кожен виріб має шанс на друге життя.

Що врешті-решт нам дає ПВХ ресайклінг в рамках розвитку та його споживання у сталому дизайні відповідних продуктів, зокрема ПВХ віконних профілів?

Розрахунок, наведений на рисунку 8, порівнює кумулятивне споживання енергії (у кіловат-годинах) при виробництві 1 тонни віконного профілю з переробленого ПВХ (ресайклінг) та первинного (нового) ПВХ. В результаті чого енергоспоживання для виробництва переробленого ПВХ (ресайклінг) – 3 814 кВт·год, первинного ПВХ – 18 453 кВт·год. У підтвердження ефективності розрахунків отримуємо заощадження – 14 639 кВт·год, що підкреслює ефективність вторинної переробки ПВХ у контексті сталого розвитку та енергоощадних технологій [24].

Кумулятивне споживання енергії в кіловат-годинах (кВт·год) на тонну віконного профілю

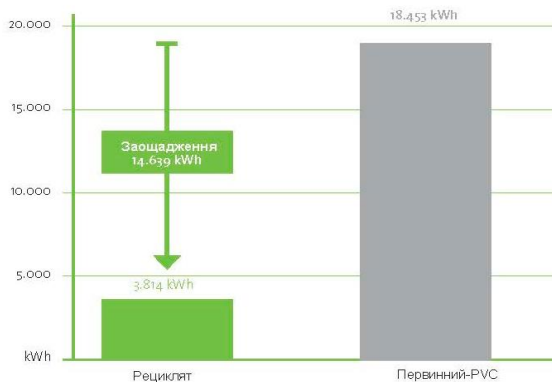


Рис. 8. Кількість енергії, заощадженої завдяки використанню перероблених матеріалів

Розрахунок, наведений на рисунку 9, ілюструє потенціал глобального потепління (ПГП) у тоннах CO_2 -еквіваленту (CO_2e), який виникає під час виробництва 1 тонни віконного профілю з ресайклінгу (переробленого ПВХ) та первинного ПВХ (виготовленого з нової сировини). В результаті були отримані наступні дані: для виробництва ресайклінгу викиди CO_2 становлять – 0,7 т CO_2e , для виробництва первинного ПВХ - 2,69 т CO_2e . Відповідно до різниці зафіксованих показників на виробництві ресайклінгу заощаджується до 1,99 т CO_2e [24].

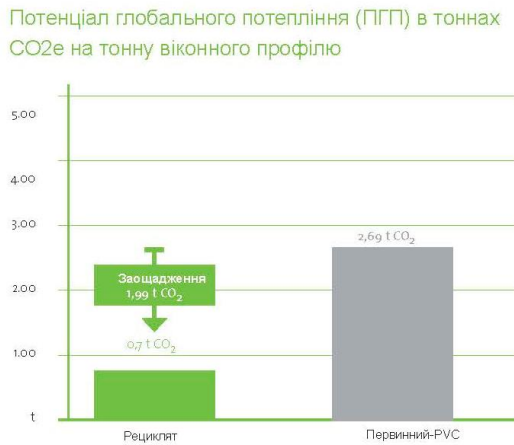


Рис. 9. Скорочення викидів парникових газів завдяки використанню рецикляту

Висновки

1. Сталий дизайн є ключем до ефективного ресайклінгу ПВХ. Правильно спроектовані віконні профілі, які враховують вимоги до розбірності, мінімальної токсичності та сумісності з системами вторинної переробки, істотно полегшують ресайклінг і зменшують екологічне навантаження протягом усього життєвого циклу продукту.

2. Інноваційні матеріали – шлях до циркулярної економіки. Необхідно якомога ширше використовувати матеріали з використанням новітніх еко-технологій, таких як WPC-композити (деревина + ПВХ), Біо-ПВХ з рослинних олій, 100% профілі з ресайклінгу як альтернативні матеріали, що знижують токсичність, вуглецевий слід та підвищують екологічну відповідність будівельної продукції.

3. В Україні необхідно активно впроваджувати енергоефективні програми з переробки ПВХ або імплементувати програми та використовувати досвід сусідніх європейських країн. Європейський досвід демонструє практичну та ефективну реалізацію сталого підходу. Проекти в Німеччині (Rewindo), Франції (Valobat, SnEP) та Польщі (POiD) створюють успішні моделі для збору та переробки старих ПВХ вікон. Вони доводять, що за підтримки державної політики, інвесторів і виробників можливо досягти сталого обороту ПВХ як ресурсу.

4. Застосування перероблених матеріалів дає змогу зменшити енергоспоживання майже в 5 разів, що суттєво скорочує ресурсні витрати та покращує екологічні показники виробництва.

5. Використання переробленого ПВХ дозволяє зменшити викиди парникових газів майже в 4 рази порівняно з виробництвом профілю з первинного ПВХ. Це суттєво знижує вплив на зміну клімату та сприяє досягненню екологічних цілей ЄС та України в контексті декарбонізації та розвитку циркулярної економіки.

6. Кількість енергії, заощадженої завдяки використанню переробленого матеріалу порівняно з використанням первинного ПВХ при виробництві 1 тонни віконного профілю, відповідає 14 639 кВт·год, а отже, річній потребі в електроенергії для 4,5 домогосподарств. Переробка вторинної сировини наприкінці терміну експлуатації дозволяє додатково заощадити 954 кВт·год порівняно зі спалюванням, що відповідає приблизно 30% річної потреби домогосподарства в електроенергії. Використання рецикляту замість первинного ПВХ економить 1,99 тонни, або близько 2 тонн CO₂. Повторна переробка профілів після закінчення терміну служби дозволяє додатково заощадити близько 2 тонн CO₂ порівняно зі спалюванням.

Сталий розвиток ніколи не застаріє, оскільки політичні, економічні та екологічні стратегії у цивілізованому світі мають розроблятися з урахуванням потреб майбутніх поколінь. Це означає, що настав час переосмислення поточних підходів. Але це також дає можливість розвивати нові ідеї та бізнес-моделі. Сьогодні багато компаній доводять, що інвестиції у сталий розвиток зрештою окупаються і він може дуже скоро перетворитися з моделі майбутнього на стратегію успіху сьогодення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. EPPA – The European PVC Window Profile and Related Building Products Association. Retrieved from: <https://www.eppa-profiles.eu>
2. VinylPlus. Progress Report 2022. Retrieved from: <https://www.vinylplus.eu>
3. Rewindo Recycling-Initiative. Retrieved from: <https://www.rewindo.de>
4. Gealan. Balance profiles. Retrieved from: <https://www.gealan.de/en/news/balance-by-gealan/>
5. Kömmerling ReFrame sustainable systems. Retrieved from: <https://www.koemmerling.com/ua/uk/сталий-розвиток/koemmerling-reframe/>
6. BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method. Retrieved from: <https://www.breeam.com>
7. USGBC. Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). Retrieved from: <https://www.usgbc.org/leed>
8. European Green Deal. Retrieved from: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
9. Sustainable Development Goals – United Nations. Retrieved from: <https://sdgs.un.org/goals>
10. UFME – Union des Fabricants de Menuiseries Extérieures. Retrieved from: <https://www.ufme.fr>
11. SnEP – Syndicat national de l'extrusion plastique. Retrieved from: <https://www.snep.org>
12. POiD – Polish Association of Window and Door Manufacturers. [Польська асоціація виробників вікон і дверей]. Retrieved from: <https://poid.eu>
13. Програма Czyste Powietrze. Retrieved from: <https://czystepowietrze.gov.pl>
14. Budujesz Dla Pokoleń. Retrieved from: <https://budujemydlapokolen.pl>

15. Wildlife Research. CSIRO Publishing. Retrieved from: <https://www.publish.csiro.au/WR>
16. Window consulting. [Віконний консалтинг]. Retrieved from: <https://oknakonsult.com>
17. GKFP – Gütegemeinschaft Kunststoff-Fensterprofilsysteme. Retrieved from: <https://www.gkfp.de>
18. BSRIA. Guidance on Net Zero Carbon Buildings. Retrieved from: <https://www.bsria.com>
19. IPCC Reports. Global Warming Potential. Retrieved from: <https://www.ipcc.ch>
20. ECHA. Regulation (EC) No 1907/2006 (REACH). Retrieved from: <https://echa.europa.eu/regulations/reach>
21. British Zero Carbon Building Standard. [Британський стандарт будівель з нульовим рівнем викидів вуглецю]. Retrieved from: <https://bregroup.com/news/buildings-to-prove-they-are-net-zero-carbon-with-uk-s-first-agreed-methodology-uk-net-zero-carbon-buildings-standard>
22. What is WPC? Care, installation, advantages and disadvantages. Retrieved from: <https://www.deceuninck.de/en-gb/wpc-wissen/what-is-wpc/>
23. Designing safe and sustainable products requires a new approach for chemicals. Retrieved from: <https://www.eea.europa.eu/publications/designing-safe-and-sustainable-products-1>
24. Rewindo annual report 2023: Plastic window recycling: countable for less energy consumption and more climate protection. Retrieved from: <https://rewindo.de/download/2817/?tmstv=1748263266>

Стаття надійшла до редакції 23.05.2025 і прийнята до друку після рецензування 18.08.2025

The article was received 23.05.2025 and was accepted after revision 18.08.2025

Кожевніков Сергій Вікторович

аспірант 3 курсу, спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища» Київського національного університету будівництва і архітектури, представник компанії GEALAN Ukraine

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

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

Березницька Юлія Олегівна

доцент кафедри «Технології захисту навколишнього середовища та охорони праці» Київського національного університету будівництва і архітектури

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

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

УДК 502.175:[504.5:502.3](477.46)

Liudmyla Zhytska¹, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4013-7936> **e-mail:** zhytska_lyudmila@ukr.net

Oksana Yehorova¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7801-5582> **e-mail:** ok.yehorova@chdtu.edu.ua

Olena Khomenko¹, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9329-0577> **e-mail:** o.khomenko@chdtu.edu.ua

Yurij Bondarenko², Candidate of Medical Sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6608-277X> **e-mail:** ck-oblses@ukr.net

¹Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

²State institution «Cherkasy Regional Center for Disease Control and Prevention of the Ministry of Health of Ukraine», Cherkasy, Ukraine

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF CHEMICAL POLLUTION OF THE ATMOSPHERE ON THE FORMATION OF CARCINOGENIC AND NON-CARCINOGENIC RISKS FOR THE HEALTH OF THE CITY POPULATION OF CHERKASK REGION

Abstract. *The article discusses current issues related to the ecological safety of atmospheric pollution and the role of anthropogenic emissions in the formation of carcinogenic and non-carcinogenic risks to the health of the population in industrial cities of the Cherkasy region. The publication materials emphasize that the accumulation of pollutants in the atmospheric air, particularly concentrations of SO₂, NO₂, CO, phenol, formaldehyde, and hydrocarbons, causes a wide range of health problems affecting the visual organs, respiratory system, and increases mortality from respiratory diseases, oncology, and other conditions. The authors analyzed the data from air pollution monitoring conducted by mobile stations of the State Institution Cherkasy Regional Center for Disease Control and Prevention of the Ministry of Health of Ukraine, as well as retrospective data from other laboratories in the region. These findings indicated the presence of the aforementioned toxicants in all collected samples. Attention is drawn to the effects of toxic substances' accumulation, the formation of carcinogenic and non-carcinogenic risks to human health in residential areas, based on the calculation of air pollution hazard indices. The authors highlight the persistence of chemical ingredients in the environment, their ability to quickly enter biological chains, and their complex impact on the human body in combination with drinking water, atmospheric air, and food products. However, atmospheric air remains the primary chain of influence. The identified compounds pose a potential threat in creating carcinogenic hazard conditions and reducing human lifespan. A clear dynamic of the growth of primary diseases is noted. The authors emphasize that the existing system for studying atmospheric pollution needs improvement, the implementation of planned measures and rules, and a clear organization of the monitoring system for their adherence and preventive actions. The article stresses the need to intensify scientific research regarding the impact of non-carcinogenic and carcinogenic factors in populated areas. It outlines the directions for the application of research results.*

Keywords: *ecological safety, chemical air pollution, carcinogenic and non-carcinogenic risks, primary diseases, monitoring.*

Л.І. Жицька¹, О.В. Єгорова¹, О.М. Хоменко¹, Ю.Г. Бондаренко²

¹Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

²Державна установа «Черкаський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України», м. Черкаси, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ НА ФОРМУВАННЯ КАНЦЕРОГЕННИХ І НЕКАНЦЕРОГЕННИХ РИЗИКІВ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ МІСТ ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Анотація. В статті розглядаються актуальні питання щодо екологічної безпеки атмосферних забруднень й ролі антропогенних викидів у формуванні канцерогенних і неканцерогенних ризиків для здоров'я населення промислових міст Черкаської області. В матеріалах публікації, зокрема, наголошується, що накопичення в атмосферному повітрі забруднювальних речовин, особливо концентрацій SO_2 , NO_2 , CO , фенолу, формальдегіду та вуглеводнів, спричиняє широкий спектр проблем зі здоров'ям органів зору, респіраторної системи, збільшує смертності від хвороб органів дихання, онкології та інше.

Автори проаналізували отримані показники власного контролю атмосферних забруднень пересувними постами Державної установи Черкаського обласного центру контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України та ретроспективні дані постів спостереження інших лабораторій міст області стосовно вмісту забруднювальних речовин у повітрі, які показали наявність вище зазначених токсикантів в усіх зразках відібраних проб.

Звертається увага на ефекти сумарії токсичних речовин, формування канцерогенних і неканцерогенних ризиків для організму людини на територіях селітебних зон населених пунктів, за розрахунками відповідних індексів небезпеки атмосферного повітря. Відмічається, що у містах області для концентрації зазначених забруднювальних речовин наявні однотипні джерела забруднення – викиди промислових підприємств, об'єктів теплоенергетики, автотранспорту та АЗС. Вказується на достатню стійкість хімічних інгредієнтів у навколишньому середовищі, здатність швидко включатись у біологічні ланцюги і діяти на організм людини комплексно, сумісно із питною водою, повітрям з атмосфери й продуктами харчування, але при цьому – атмосферне повітря залишається первинним ланцюгом впливу. Виявлені сполуки є потенційною загрозою в створенні канцерогенно небезпечних умов проживання та скорочення тривалості життя людей. Висвітлюється чітка динаміка зростання первинного захворювання.

Автори публікації наголошують, що існуюча система дослідження атмосферних забруднень потребує вдосконалення, виконання запланованих заходів та правил, чіткої організації системи контролю за їх дотриманням та превентивних дій. Ставиться акцент на необхідності активізації наукових досліджень щодо дії неканцерогенних та канцерогенних факторів на території населених пунктів. Висвітлюються напрямки застосування результатів дослідження.

Ключові слова: екологічна безпека, хімічне забруднення атмосфери, канцерогенні та неканцерогенні ризики, первинні захворювання, моніторинг.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.177-190>

Вступ

Забруднення повітря є однією з найсерйозніших екологічних загроз сучасності, що становить значну небезпеку для здоров'я людини, зокрема для дітей та осіб старшого віку. Це явище є важливою детермінантою здоров'я, оскільки довгострокове перебування в умовах забрудненого повітря підвищує ризик розвитку ряду хронічних захворювань, включаючи респіраторні, серцево-судинні та онкологічні захворювання. Серед найбільш небезпечних компонентів атмосферного забруднення – канцерогенні та токсичні речовини, що потрапляють у повітря в результаті діяльності промислових підприємств, транспорту та інших джерел.

Здійснення цілей стратегії сталого розвитку України ставить перед суспільством реалізацію завдань безпеки умов проживання населення, до яких, безперечно, відносять якість атмосферного середовища, збереження його чистоти та функціональних можливостей [1, 2]. В Законі України щодо основних засад (стратегії) екологічної політики держави на період до 2030 року зазначено, що протягом тривалого часу суспільний та промислово-технологічний розвиток супроводжувався незбалансованістю принципів експлуатації природних ресурсів, а захист довкілля відзначався низькою пріоритетністю. Оскільки промисловість, енергетика і транспорт є основними джерелами викидів, які забруднюють атмосферу, а забруднене повітря прямо та опосередковано впливає на усі складові якості довкілля, а також на здоров'я населення, що проживає у місцях накопичення забруднювальних речовин, масові значення яких постійно збільшуються [3-5], – це унеможливило досягнення мети сталого розвитку. В цих умовах контроль стану атмосферного повітря є першочерговим завданням науковців та держави. Зокрема, тривалий вплив токсичних речовин, накопичених у повітрі, підвищує ризики смертей, спричинених ішемічною хворобою серця на 24%, раку легень на 28%, хронічних обструктивних хвороб і легеневи інфекцій на 43%, інсультів на 25% та інших. У тому числі, зростає показник хвороб Альцгеймера та деменції [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням впливу якості атмосферного повітря на безпеку для населення присвячено багато робіт, які свідчать про помітний небажаний як короткостроковий, так і довгостроковий вплив потенційно токсичних компонентів викидних газів автомобілів на здоров'я людини.

Аналіз вітчизняних публікацій висвітлює цілий ряд аспектів, які стосуються впливу шкідливих факторів атмосферного середовища на динаміку захворюваності, тривалості життя чи смертності населення, спричинені цими обставинами. Вони підтверджують, що накопичення в повітрі високих концентрацій діоксиду сірки, оксидів азоту, оксидів вуглецю, фенолу, формальдегіду та вуглеводнів створює широкий спектр різного роду проблем зі здоров'ям, а його відновлення та підтримання на належному рівні потребує значних коштів та часу [7-9].

В роботах багатьох авторів [9-11] повідомляється, що забруднювачем повітря з найширшим переліком впливу на здоров'я (близько 30 діагнозів і причин смерті) є тверді частинки із середнім аеродинамічним діаметром менше 2,5 мікрометрів (PM_{2,5}), а також частинки діаметром менше 10 мікрометрів (PM₁₀). Ці мікроскопічні частинки, які є загальним проксі-індикатором

забруднення повітря, можуть проникати глибоко в легені, збільшуючи кількість респіраторних захворювань, а також становлять серйозну загрозу для імунної системи та значною мірою сприяють ризику захворювань на рак.

Клінічні дослідження показують, що істотну роль у виникненні численних хвороб відіграють оксиди нітрогену. Короткостроковий і довготривалий вплив NO_2 пов'язують із підвищеним ризиком смертності від респіраторних та серцево-судинних захворювань [9, 11], від раку [12], захворювань на аутизм [13] і діабет 2 типу [13-15].

Формальдегід є найважливішим канцерогеном і основним токсичним забруднювачем атмосферного повітря. Дослідженнями багатьох авторів [16, 17] була доведена його роль у захворюванні на рак. Результати моніторингових досліджень показали, що в будинках, розташованих на відстані до 10 м від великих транспортних автомагістралей, мешканці хворіють на онкологічні захворювання в 3–4 рази частіше, ніж у будинках, віддалених від дороги на відстань 50 м [18-20]. Тому питання, пов'язані з оцінкою ризику для здоров'я населення урбанізованих територій від забруднення атмосферного повітря автотранспортом, потребують подальшого розвитку та дослідження.

Мета досліджень. Дане дослідження спрямоване на оцінку канцерогенних і неканцерогенних ризиків для здоров'я населення внаслідок хімічного забруднення атмосферного повітря населених пунктів Черкаської області.

Матеріали та методи дослідження. Як об'єкт оцінки впливу забруднення атмосферного повітря на рівень небезпеки для здоров'я населення було обрано обласні центри Черкаської області з розвинутою промисловістю і значним транспортним навантаженням. Для розрахунку емісії поллютантів використовували результати натурних спостережень. Для дослідження було обрано 25 ділянок, що проходять як через житлові, так і промислові райони, з різним рівнем транспортного навантаження, різною щільністю забудови, відстанню від бровки дороги до найближчих будівель тощо.

Для визначення емісії забруднюючих речовин (оксиду карбону, оксидів нітрогену NO_x (у перерахунку на діоксид нітрогену), вуглеводнів CH_x , сажі, діоксиду сульфуру SO_2 , формальдегіду CH_2O і бензопірену $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$) використовували методику [21]. Оцінку ризику для здоров'я населення проводили за методикою [22].

Результати дослідження

Черкаську область відносять до густонаселених регіонів. Постановою Верховної Ради України від 17.07.2020 № 807-IX затверджений адміністративно-територіальний устрій базового та районного рівнів Черкаської області, яким передбачено утворення 4 районів та 66 ОТГ. Середня щільність населення області становить 55 осіб на 1 км². До найбільш населених пунктів, в межах області, належать м. Черкаси, м. Умань, м. Сміла, м. Ватутіне та м. Канів.

До складових промислового комплексу області відносять такі потужні галузі, як харчова, хімічна, фармацевтична, машинобудівна та енергетична. На них припадає більш як 84,0% промислового виробництва. Не останнє місце займають виробництва основних фармацевтичних продуктів та фармацевтичних препаратів, гумових і пластмасових виробів, іншої неметалевої мінеральної продукції, текстильне, металургійне та виробництво готових металевих виробів, добувна промисловість і розроблення кар'єрів, й інші.

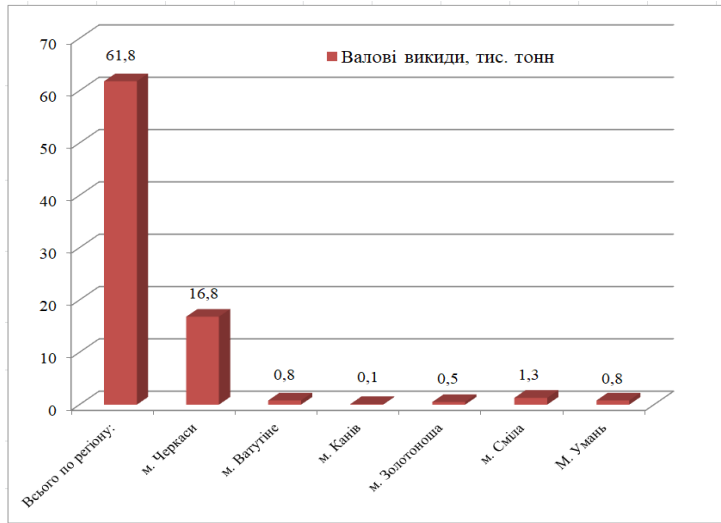


Рис. 2. Об'єми валових викидів забруднень від стаціонарних джерел в найбільших містах Черкаської області

Аналіз статистичних даних показав, що у загальному об'ємі викидів Черкаського регіону за валовим показником переважають наступні забруднювальні речовини [23], наведені на рисунку 3.

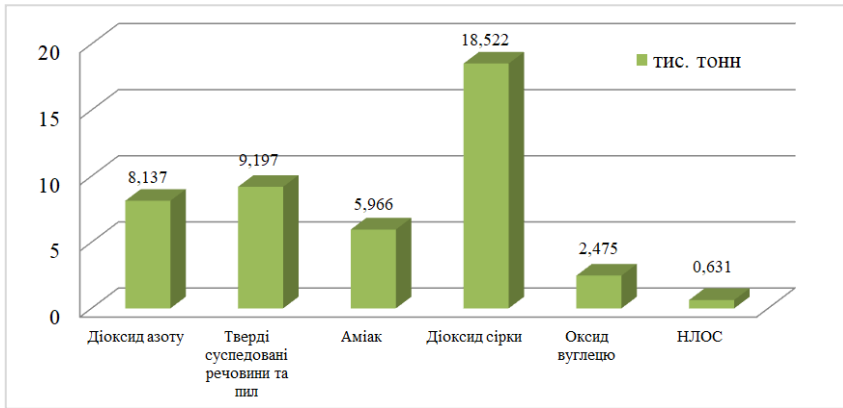


Рис. 3. Об'єми валових викидів основних забруднювальних речовин від стаціонарних джерел забруднення в межах Черкаської області

Проведення моніторингу на межі санітарно-захисних зон в межах впливу об'єктів промислового, сільськогосподарського, а також комунального значення та в межах селітебних зон поблизу вуличних магістралей, що здійснювалось Державною установою «Черкаський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України» у 2024 році, показало, що у відібраних і проаналізованих 7083 пробах атмосферного повітря були присутні наступні забруднювальні речовини – діоксид азоту, сірчистий ангідрид, формальдегід, вуглецю оксид, аміак, бензин, фенол та його похідні. У 2,13% (151 проба) виявлено перевищення гранично допустимих максимально разових концентрацій (далі – ГДК), зокрема, формальдегіду –

0,041 мг/м³ (перевищення ГДК в 1,17 раза), оксиду вуглецю – 8 мг/м³ (перевищення ГДК в 1,6 раза) та бензину – 7 мг/м³ (перевищення ГДК в 1,4 раза). Особливо це проявляється в зоні впливу автодоріг в м. Черкаси [23]. Значення середньодобових концентрацій оксидантів у атмосфері інших міст області встановлено на рівні гранично допустимих концентрацій.

Середньодобові концентрації зазначених токсичних речовин у містах області наведено на рисунку 4.

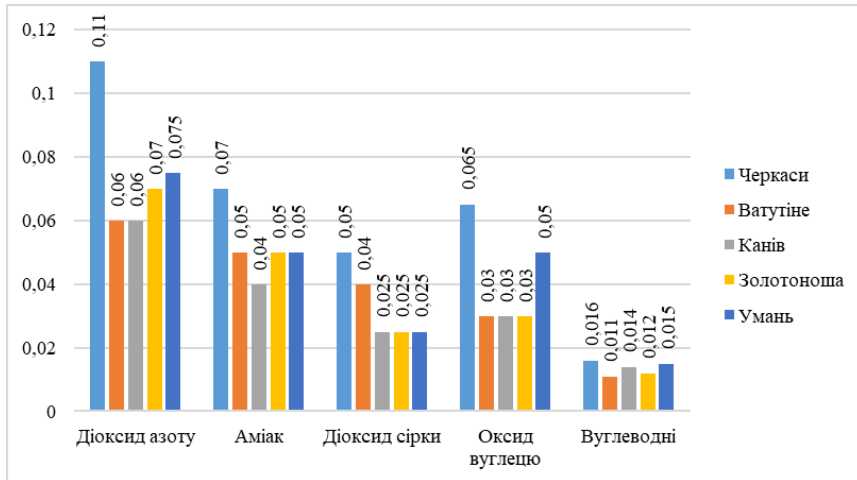


Рис. 4. Значення середньодобових концентрацій токсичних речовин у повітрі окремих міст Черкаської області

Наведені дані наявності хімічних сполук у атмосферному повітрі засвідчують перманентність їхнього впливу на оточуюче середовище та населення. Також слід зауважити, що за показником неканцерогенних ризиків окрема сполука може характеризуватись як небезпечна для людського організму навіть за умови не перевищення її ГДК у повітрі й визначені показники забруднення будуть меншими за одиницю.

Розрахунок фактичного рівня впливу сполук з безпечними (референтними) концентраціями надано в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння фактичного рівня впливу сполук з безпечними (референтними) концентраціями

Населений пункт	HQ – ризик розвитку неканцерогенних ефектів			HI	Рівень ризику
	Оксид сульфуру (SO ₂)	Оксид нітрогену (NO ₂)	Монооксид карбону (CO)		
Черкаси	1,0	2,8	2,0	5,8	Високий: органи дихання, імунна система
Ватутіне	0,8	1,8	2,0	4,7	
Канів	0,5	1,5	1,0	3,0	Насторожуючий: органи дихання, кров, імунна система
Золотоноша	0,5	1,5	1,0	3,0	
Умань	0,5	1,8	1,0	3,3	

Оцінка ризику розвитку неканцерогенних ефектів за комбінованого впливу хімічних речовин показав, що існує висока ймовірність впливу хімічних забруднень на населення.

Підрахунок індексу небезпеки (НІ) для різних міст засвідчує рівень потенційного ризику для здоров'я населення через забруднення повітря шкідливими речовинами. Високий рівень ризику в Черкасах вказує на серйозну загрозу для здоров'я, особливо для органів дихання та імунної системи. Помірний рівень ризику у Ватутіному демонструє, що загроза для здоров'я існує, але не є такою критичною. Насторожуючий рівень ризику у Каневі, Золотоноші та Умані вказує на можливі проблеми зі здоров'ям, зокрема для органів дихання, крові та імунної системи.

Загалом, результати вказують на те, що забруднення повітря має суттєвий вплив на здоров'я, особливо в містах з високим рівнем індексу небезпеки. Це свідчить про необхідність вжиття заходів для покращення екологічної ситуації в цих регіонах. Разом з цим розрахунок канцерогенних ризиків за отриманими значеннями концентрацій показав середній рівень впливу факторів на населення (таблиця 2).

Таблиця 2. Розрахунок розвитку канцерогенного ефекту для населення

	Концентрація CH ₂ O, мг/м ³	LAAD	CR	PCR	Населення, осіб	Рівень ризiku
Черкаси	0,032	0,00876712	0,00041	107,83	267361	Середній
Ватутіне	0,030	0,00821917	0,00038	5,96	15763	Середній
Канів	0,025	0,00684931	0,00032	7,30	23172	Середній
Золотоноша	0,020	0,00547945	0,000252	6,86	27206	Середній
Умань	0,025	0,00684931	0,00032	25,69	81525	Середній

Аналіз загальної структури видів хвороб населення Черкаської області виявив, що серед дорослого населення віком від 18 років і старше відсоток найбільших захворювань складають хвороби органів дихання та системи кровообігу, що наведено на рисунку 5. Серед них найбільше проявляються гострі хронічні фарингіти і тонзиліти, алергічні риніти і хронічні бронхіти, пневмонії і інші легеневі хвороби. Прогресують гіпертонічні хвороби, ішемічні хвороби серця, в тому числі з гіпертонічною хворобою; стенокардія та хвороби паліативних стадій становлять 2,1%.

За останні роки в області прослідковується зростання контингенту хворих з соціально значущих захворювань, які, зокрема, включають в себе «Грип», «Коронавірус», а також «Туберкульоз». Адже хімічні забруднення впливають на імунітет, тому ослаблений людський організм швидше піддається впливу.

Внаслідок присутності хімічних речовин у повітрі населених пунктів кількість первинних звернень щодо алергічних захворювань, захворювань дихальних шляхів збільшується (рисунк 6). Страждає ендокринна і нервова система людського організму, із-за неможливості швидкої адаптації до наявного впливу й потрапляння концентрацій токсинів у легені та кров.

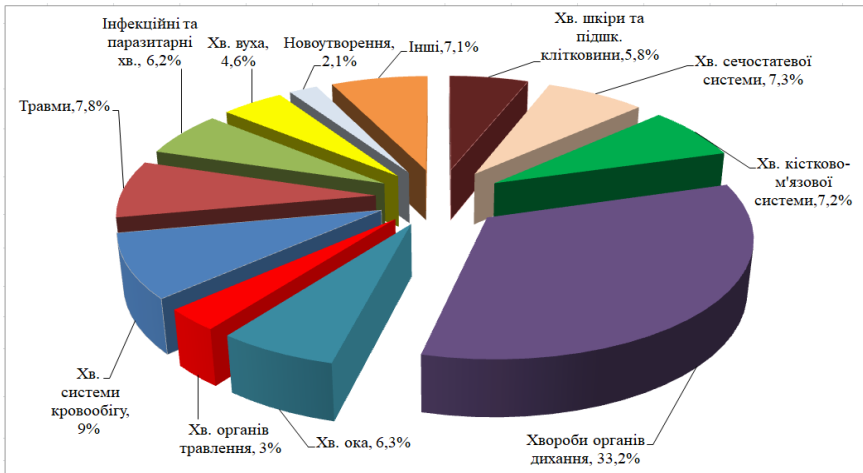


Рис. 5. Загальна структура первинної захворюваності населення Черкаської області



Рис. 6. Показники зростання первинних захворювань населення Черкаської області за останні роки (на 10 тис. населення)

Динаміка структури первинних захворювань населення області останніми роками є невтішною. Сконцентровані в атмосферному повітрі забруднення можуть впливати на розвиток серцево-судинних захворювань, насамперед таких як ішемічна хвороба серця та інсульт, ініціювати також респіраторні захворювання – інфекції нижніх дихальних шляхів, хронічну обструктивну хворобу легень, рак трахеї, бронхів і легень. Тому в області збільшується кількість первинних звернень онкохворих осіб (рисунок 7). Окрім того, групу ризику становлять люди з цукровим діабетом другого типу, імунна система яких страждає найбільше.

В умовах військового стану, частих ракетних обстрілів та бойових дій створюються нові унікальні виклики для існуючої системи охорони навколишнього середовища та громадського здоров'я регіону. Все це потребує виважених підходів щодо створення дієвої системи контролю забруднень та профілактики захворюваності, вдосконалення методів відбору проб повітря у місцях скупчення забруднень та їх системного аналізу.

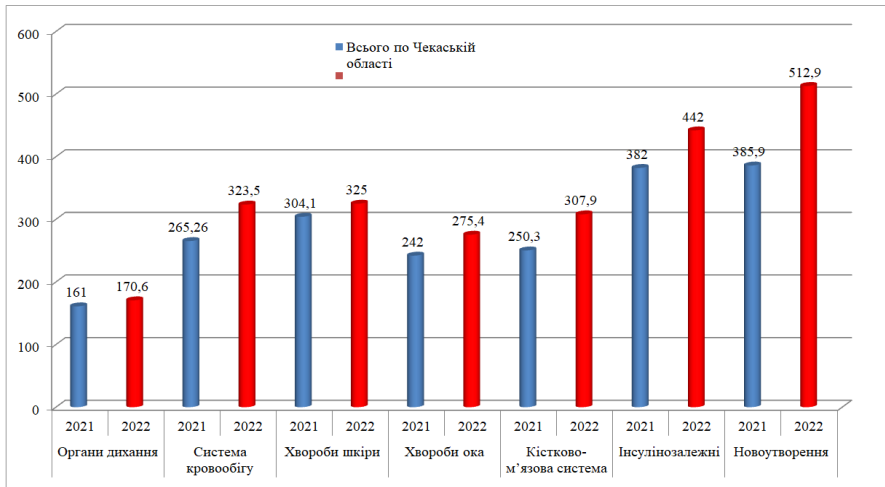


Рис. 7. Динаміка структури первинних захворювань населення Черкаської області за останні роки (на 10 тис. населення)

Наведені вище дані показують, що для оцінки впливу повітряного середовища в населених пунктах Черкаської області на людину коефіцієнти та індекси небезпеки розвитку неканцерогенних та канцерогенних ефектів є більш інформативними, ніж показники забруднення. Причому якщо показники забруднення за критерієм ГДК дозволяють оцінити лише якість повітряного середовища, то за величиною індексу небезпеки можна визначити ризики впливу цих сполук вже безпосередньо на здоров'я людини.

Висновки

Динамічна система атмосфери постійно змінюється за рахунок накопичення та розсіювання великої кількості хімічних забрудників. Їх вплив на життєдіяльність населення області зростає, що потребує постійного контролю токсичних речовин для оперативної інформації мешканців та зменшення існуючих ризиків.

Затверджений Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря передбачає розробку заходів щодо вдосконалення наявних мереж спостереження за якістю атмосферного повітря, створення або вдосконалення лабораторій спостереження за станом атмосферного повітря, після затвердження відповідних програм розвитку регіонів. Тому організація постів спостереження в інших містах області або ж створення додаткових програм моніторингу пересувними постами контролю забруднень та підфакельних концентрацій хімічних речовин, які будуть обладнані сучасними засобами контролю, є доцільним кроком в умовах підвищених ризиків забруднення атмосферного середовища.

Проведені дослідження масштабів антропогенного навантаження на атмосферне повітря, навколишнє природне середовище та здоров'я населення Черкаської області виявили, що причиною є зростання викидів із стаціонарних і пересувних джерел забруднення, накопичення токсинів у результаті вибухів і частих пожеж.

Протягом останніх років склад домішок повітря регіону змінився та є не до кінця вивченим. Таким чином, дослідження стану та якості повітряного басейну області в сучасних техногенних умовах, висвітлення динаміки змін у часі й просторовому зрізі, на нашу думку, є важливим завданням для сучасної науки. Впровадження превентивних заходів знизить ризики розвитку та загострення захворювання людей. Вирішення питань, піднятих у цій публікації, допоможе збереженню середовища, сприятливого для життєдіяльності людини.

Перспективним напрямом є дослідження довготривалих ефектів хімічних забруднювачів атмосфери на здоров'я населення, зокрема оцінка ризиків для різних вікових та соціальних груп. Це включає дослідження того, як рівень забруднення впливає на дітей, людей похилого віку, а також людей з хронічними захворюваннями або зниженим імунітетом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України. (n.d.). Про Стратегію сталого розвитку України до 2030 року. Retrieved from <https://ips.ligazakon.net/document/JH6YF00A?an=332>
2. Закон України. (n.d.). Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>
3. Некос, А. Н., & Кравченко, О. К. (2012). Оцінка стану та динаміки забруднення атмосферного повітря малих міст Харківської області. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, 1(2), 122-127.
4. Тарасова, В. В. (2013). Вплив забруднення атмосферного повітря на стан здоров'я населення. *Агросвіт*, (16), 24-26.
5. Черниченко, І. О., Литвиченко, О. М., Бабій, В. Ф., Кондратенко, О. Є., & Главачек, Д. О. (2023). Хімічні канцерогени у навколишньому середовищі України: ризик для населення, шляхи попередження, удосконалення гігієнічного регламентування. *Довкілля та здоров'я*, 3(108), 4-11.
6. Мокієнко, А. В., & Гушук, І. В. (2024). Щодо визначення детермінант здоров'я. In Н. С. Полька (Ed.), *Зб. тез доп. науково-практичної конференції з міжнародною участю «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України (XX марзєєвські читання)»* (Vol. 24, pp. 47-48). К.: Інтердрук.
7. Sipakov, R., Trofimovich, V., Voloshkina, O., & Berezniatskaya, Y. (2018). Assessment and forecast for the creation of photochemical smog over transport overpasses in Kyiv. *Екологічна безпека та природокористування*, 25(1), 44-51.
8. Nekos, A. N., Medvedeva, Y. V., & Cherkashyna, N. I. (2019). Assessment of environmental risks from atmospheric air pollution in industrially developed regions of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(3), 511-518. <https://doi.org/10.15421/111947>
9. Chiusolo, M., Cadum, E., Stafoggia, M., Galassi, C., et al. (2011). Short-term effects of nitrogen dioxide on mortality and susceptibility factors in 10 Italian cities: The EpiAir study. *Environmental Health Perspectives*, 119(9), 1233-1238. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002904>
10. Власик, Л. І., & Власик, Л. Й. (2017). Шляхи реалізації в Україні ініціатив ВООЗ щодо профілактики неінфекційних захворювань, обумовлених забрудненням повітря. *Актуальні проблеми транспортної медицини*, (1), 44-51.
11. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., et al. (2020). Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. *Journal of Health and Pollution*, 10(25). <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.25.200303>
12. Mannucci, P. M., & Franchini, M. (2017). Health effects of ambient air pollution in developing countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(9), 1048. <https://doi.org/10.3390/ijerph14091048>

13. Singh, D. P., Gadi, R., Mandal, T. K., Saud, T., Saxena, M., & Sharma, S. K. (2013). Emissions estimates of PAH from biomass fuels used in rural sector of Indo-Gangetic Plains of India. *Atmospheric Environment*, 68, 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.042>
14. Spiegel, J., & Maystre, L. Y. (2020). Environmental pollution control, part VII – the environment, Chapter 55. *Encyclopedia of Occupational Health and Safety*.
15. Moore, F. C. (2009). Climate change and air pollution: Exploring the synergies and potential for mitigation in industrializing countries. *Sustainability*, 1(1), 43-54. <https://doi.org/10.3390/su1010043>
16. Yousefi, H., Lak, E., Mohammadi, M. J., & Shahriyari, H. A. (2022). Carcinogenic risk assessment among children and adults due to exposure to toxic air pollutants. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(16), 23015–23025. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17300-0>
17. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Kameneva, I., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., & Yatsyshyn, T. (2020). Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. *Journal of Health & Pollution*, 10(25), 200303. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.25.200303>
18. Kenessary, D., Kenessary, A., Adilgireiuly, Z., Akzholova, N., Erzhanova, A., Dosmukhametov, A., Syzdykov, D., Masoud, A. R., & Saliev, T. (2019). Air pollution in Kazakhstan and its health risk assessment. *Annals of Global Health*, 85(1), 133. <https://doi.org/10.5334/aogh.2535>
19. Bidoli, E., Pappagallo, M., Birri, S., Frova, L., Zanier, L., & Serraino, D. (2016). Residential proximity to major roadways and lung cancer mortality, Italy, 1990-2010: An observational study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(2), 191. <https://doi.org/10.3390/ijerph13020191>
20. Tamayo-Uria, I., Boldo, E., García-Pérez, J., Gómez-Barroso, D., Romaguera, E. P., Cirach, M., & Ramis, R. (2018). Childhood leukaemia risk and residential proximity to busy roads. *Environment International*, 121(Pt 1), 332–339. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.056>
21. Оцінювання інгредієнтного і параметричного забруднення придорожного середовища системою «транспортний потік – дорога». (2011). *Методичні рекомендації* М 218-02070915-694:2011.
22. Оцінка канцерогенного та неканцерогенного ризику для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря. (2023). *Методичні рекомендації* МР 22.12-142-2007. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1811282-23#Text>
23. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Черкаській області у 2023 році. (2024). Черкаси: Управління екології та природних ресурсів Черкаської обласної державної адміністрації.

Стаття надійшла до редакції 12.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 27.08.2025

REFERENCES

1. Закон Ukrainy. (n.d.). Pro Stratehiyu stalogo rozvytku Ukrainy do 2030 roku. Retrieved from <https://ips.ligazakon.net/document/JH6YF00A?an=332>
2. Закон Ukrainy. (n.d.). Pro Osnovni zasady (stratehiyu) derzhavnoyi ekolohichnoyi polityky Ukrainy na period do 2030 roku. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>
3. Nekos, A. N., & Kravchenko, O. K. (2012). Otsinka stanu ta dynamyky zabrudnennya atmosferного povitrya malykh myst Kharkivskoyi oblasti. *Lyudyna ta dovkillya. Problemy neoekolohiyi*, 1(2), 122-127.
4. Tarasova, V. V. (2013). Vplyv zabrudnennya atmosferного povitrya na stan zdorov'ja naselennja. *Ahrosvit*, 1(6), 24-26.

5. Chernychenko, I. O., Lytvychenko, O. M., Babij, V. F., Kondratenko, O. Je., & Hlavachek, D. O. (2023). Khimichni kanceroheny u navkolyshnomu seredovyschi Ukrainy: ryzyk dlya naselennya, shlyakhy poperedzhennya, udoskonalennya higienichnogo rehlementuvannya. *Dovkillya ta zdorov'ya*, 3(108), 4-11.
6. Mokiienko, A. V., & Hushchuk, I. V. (2024). Shchodo vyznachennya determinant zdorov'ya. In N. S. Pol'ka (Ed.), *Zb. tez dop. naukovo-praktychnoji konferencii z mizhnarodnoyu uchastyu "Aktual'ni pytannja hromad'koho zdorov'ya ta ekolohichnoji bezpeky Ukrainy (XX marz'yevs'ki chytannja)* (Vol. 24, pp. 47-48). K.: Interdruk.
7. Sipakov, R., Trofimovich, V., Voloshkina, O., & Bereznitskaya, Y. (2018). Assessment and forecast for the creation of photochemical smog over transport overpasses in Kyiv. *Екологічна безпека та природокористування*, 25(1), 44-51.
8. Nekos, A. N., Medvedeva, Y. V., & Cherkashyna, N. I. (2019). Assessment of environmental risks from atmospheric air pollution in industrially developed regions of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(3), 511-518. <https://doi.org/10.15421/111947>
9. Chiusolo, M., Cadum, E., Stafoggia, M., Galassi, C., et al. (2011). Short-term effects of nitrogen dioxide on mortality and susceptibility factors in 10 Italian cities: The EpiAir study. *Environmental Health Perspectives*, 119(9), 1233–1238. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002904>
10. Vlasik, L. I., & Vlasik, L. J. (2017). Shlyakhy realizacii v Ukraini inicijativ VOOZ shchodo profilaktyky neinfekcijnykh zakhvoryuvan', obumovlenykh zabruzdnennnyam povitr'ya. *Aktual'ni problemy transportnoji medycyny*, (1), 44-51.
11. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Kameneva, I., Taraduda, D., & Yatsyshyn, T. (2020). Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. *Journal of Health and Pollution*, 10(25). <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.25.200303>
12. Mannucci, P. M., & Franchini, M. (2017). Health effects of ambient air pollution in developing countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(9), 1048. <https://doi.org/10.3390/ijerph14091048>
13. Singh, D. P., Gadi, R., Mandal, T. K., Saud, T., Saxena, M., & Sharma, S. K. (2013). Emissions estimates of PAH from biomass fuels used in rural sector of Indo-Gangetic Plains of India. *Atmospheric Environment*, 68, 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.042>
14. Spiegel, J., & Maystre, L. Y. (2020). Environmental pollution control, part VII – the environment, Chapter 55. *Encyclopedia of Occupational Health and Safety*.
15. Moore, F. C. (2009). Climate change and air pollution: Exploring the synergies and potential for mitigation in industrializing countries. *Sustainability*, 1(1), 43-54. <https://doi.org/10.3390/su1010043>
16. Yousefi, H., Lak, E., Mohammadi, M. J., & Shahriyari, H. A. (2022). Carcinogenic risk assessment among children and adults due to exposure to toxic air pollutants. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(16), 23015–23025. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17300-0>
17. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Kameneva, I., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., & Yatsyshyn, T. (2020). Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. *Journal of Health & Pollution*, 10(25), 200303. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.25.200303>
18. Kenessary, D., Kenessary, A., Adilgireiuly, Z., Akzholova, N., Erzhanova, A., Dosmukhametov, A., Syzdykov, D., Masoud, A. R., & Saliev, T. (2019). Air pollution in Kazakhstan and its health risk assessment. *Annals of Global Health*, 85(1), 133. <https://doi.org/10.5334/aogh.2535>
19. Bidoli, E., Pappagallo, M., Birri, S., Frova, L., Zanier, L., & Serraino, D. (2016). Residential proximity to major roadways and lung cancer mortality, Italy, 1990-2010: An observational study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(2), 191. <https://doi.org/10.3390/ijerph13020191>

20. Tamayo-Uria, I., Boldo, E., García-Pérez, J., Gómez-Barroso, D., Romaguera, E. P., Cirach, M., & Ramis, R. (2018). Childhood leukaemia risk and residential proximity to busy roads. *Environment International*, 121(Pt 1), 332–339. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.056>
21. Otsinyuvannya ingradientnoho i parametrychnoho zabruzdnennya prydozhnoho seredovyschya systemoyu "transportnyj potik – doroha". (2011). Metodichni rekomendatsii M 218-02070915-694:2011.
22. Otsinka kancerohennogo ta nekancerohennogo ryzyku dlya zdorov'ya naselennya vid khimichnogo zabruzdnennya atmosferного повітря. (2023). Metodichni rekomendatsii MR 22.12-142-2007. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1811282-23#Text>
23. Rehional'na dopovid' pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Cherkaskii oblasti u 2023 roci. (2024). Cherkasy: Upravlinnya ekolohii ta pryrodnykh resursiv Cherkaskoyi oblasnoyi derzhavnoi administratsii.

The article was received 12.06.2025 and was accepted after revision 27.08.2025

Жицька Людмила Іванівна

кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Черкаський державний технологічний університет

Адреса робоча: бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4013-7936> **e-mail:** zhytska_lyudmila@ukr.net

Сгорова Оксана В'ячеславівна

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Черкаський державний технологічний університет

Адреса робоча: бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7801-5582> **e-mail:** ok.yehorova@chdtu.edu.ua

Хоменко Олена Михайлівна

кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри екології, Черкаський державний технологічний університет

Адреса робоча: бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9329-0577> **e-mail:** o.khomenko@chdtu.edu.ua

Бондаренко Юрій Григорович

кандидат медичних наук, доцент, Державна установа «Черкаський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України»

Адреса робоча: вул. Волкова, 3, м. Черкаси, 18005, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6608-277X>

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copyring © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. All rights reserved.

ДО УВАГИ АВТОРІВ ЗБІРНИКА

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню збірника.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова (не менше п'яти) двома мовами (українською та англійською).

Підготовка статті здійснюється в текстовому редакторі MS WORD for WINDOWS, з використанням шрифту Times New Roman, Суг, кегль 11, одинарний інтервал, полями 2,0 см з кожного боку, заданим розміром сторінок 17х26 см.

Усі формули мають бути набрані в редакторі MathType.

Ілюстрації повинні обов'язково нумеруватися, мати книжкову орієнтацію і не можуть перевищувати за розміром задану сторінку (параметри сторінки 17х26 см з полями 2,0 см). Перелік літературних джерел перекладається англійською мовою (або транслітерується в романському алфавіті) і подається відповідно до міжнародного стандарту оформлення наукових публікацій **APA (American Psychological Association) style** загальним списком у кінці статті за чергою посилань у тексті.

Наприкінці статті наводиться коротка довідка про авторів, де вказуються прізвище, повне ім'я та по батькові авторів, науковий ступінь, вчене звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, особисті дані кожного з авторів (адреса, місто, країна, контактний телефон, e-mail), ORCID ID.

Обов'язково слід надати електронну версію статті в редакторі Microsoft Word.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами збірника, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ збірника, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником. Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія збірника.

Електронна версія збірника, правила оформлення та вимоги до статей містяться в Інтернеті на сайті <http://www.es-journal.in.ua>, який систематично оновлюється.

Збірник наукових праць також представлений на сайті Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України <http://itgip.org/> у розділі «Видавнича діяльність» та на сайті бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури <http://library.knuba.edu.ua/node/883>.

Редактор – В.П. Берчун

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36а.
Тел.: (044) 360-22-66
www.yuston.com.ua

**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
серія дк № 497 від 09.09.2015 р.**

Підписано і здано до друку 30.09.25 Формат 70x108/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 16.45
Обл.-вид. арк. 12.86
Замовлення № _____

Тираж 300 примірників

КИЇВ 2025