



**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 (51), липень – вересень 2024 р.

Заснований у 2008 р.  
Виходить 4 рази на рік

---

**Academic journal**

Issue 3 (51), July – September 2024

Founded in 2008  
The journal is published 4 times a year

**КИЇВ 2024**

---

**KYIV 2024**

**ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:****О.М. ТРОФИМЧУК**, д-р техн. наук,  
проф., чл.-кор. НАНУ**ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:****О.С. ВОЛОШКІНА**, д-р техн. наук, проф.**Н. КАСАГЛІ**, професор, Італія**Н. МАРГВЕЛАШВІЛІ**, PhD, Австралія**Ю.І. КАЛЮХ**, д-р техн. наук, проф.**ВИКОНАВЧИЙ РЕДАКТОР:****РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ****В.О. ВАСЯНИН**, д-р техн. наук**О.А. ВЛАДИМИРСЬКИЙ**, д-р техн. наук**О.М. ГУНЧЕНКО**, канд. техн. наук, проф.**С.О. ДОВГИЙ**, д-р фіз.-мат. наук, проф.,  
академік НАНУ**В.Б. ЄГОРОВ**, д-р техн. наук**С.В. ЗАЙЦЕВ**, д-р техн. наук, проф.**О.В. КОПІЙКА**, д-р техн. наук, проф.**Г.М. КОЧЕТОВ**, д-р техн. наук, проф.**Т.І. КРИВОМАЗ**, д-р техн. наук, проф.**О.Є. КРУЖИЛКО**, д-р техн. наук**О.Г. ЛЕБІДЬ**, д-р техн. наук**М.Л. МИРОНЦОВ**, д-р техн. наук**В.О. МІЛЕЙКОВСЬКИЙ**, д-р техн. наук, проф.**Т.О. НЕГРІЙ**, канд. техн. наук**О.В. НЕСТЕРЕНКО**, д-р техн. наук**Д.В. СТЕФАНИШИН**, д-р техн. наук**С.В. СУКАЧ**, д-р техн. наук, проф.**О.М. ТЕРЕНТЬЄВ**, д-р техн. наук**О.М. ТИХЕНКО**, д-р техн. наук, проф.**Т.М. ТКАЧЕНКО**, д-р техн. наук**В.М. ТРИСНЮК**, д-р техн. наук**В.О. УСТИМЕНКО**, д-р фіз.-мат. наук, проф.**В.Ф. ФРОЛОВ**, д-р техн. наук, проф.**Д.І. ЧЕРНІЙ**, д-р техн. наук**С.Й. ШАМАНСЬКИЙ**, д-р техн. наук**Є.О. ЯКОВЛЄВ**, д-р техн. наук**МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА****М.Й. ВАЛЕРІ**, проф., Польща**М. ЖЕЛЕЗНЯК**, д-р техн. наук, професор,  
Фукусіма, Японія**Д. МІНТЕР**, проф., Великобританія**А. МІШО**, дослідник, Франція**М.Г. МУСТАФАЄВ**, д-р с.-г. наук, Азербайджан**Я. ПЕКУТІН**, проф., Польща**ПІНГ ЛУ**, проф., Китай

---

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол № 9 від 16.09.2024)

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

**ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА**

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

**АДРЕСА РЕДАКЦІЇ**

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

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



Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

## ЗМІСТ

### ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

<b>Петрушка І.М., Мокрий В.І., Дмитрів Б.А.</b> Аналіз технологій утилізації та використання волокнистого макулатурного скопу.....	5
<b>Осокіна Н.П.</b> Сучасні проблеми екології України: сільськогосподарські забруднювачі і якість питної води м. Києва.....	22
<b>Mehdiyeva N.Z.</b> Fertility indicators of soils in the Siyazan-Sumgayit massive	28
<b>Майкович В.Є., Адаменко Я.О.</b> Оцінка впливу утворення будівельних відходів на довкілля.....	33
<b>Адаменко С.Я., Архипова Л.М.</b> Дослідження закономірностей змін PM <sub>2,5</sub> та PM <sub>10</sub> в атмосферному повітрі Прикарпаття.....	47
<b>Мац А.Д.</b> Дослідження особливостей температурного режиму міста Миколаєва і області в контексті питання зміни клімату.....	59

### ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<b>Tsopa V., Yavorska O., Borysovska O., Cheberyachko L., Nehrii T.</b> The process of dangerous event management taking into account economic, environmental and occupational losses.....	72
<b>Сукач С.В., Ченчева О.О., Козловська Т.Ф., Лашко Є.Є., Рєзнік Д.В., Ткачук К.К.</b> Забезпечення нормалізації аероіонного режиму у виробничих приміщеннях шляхом ультразвукової іонізації повітря.....	88

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

<b>Трофимчук О.М., Лебідь О.Г., Калюх Ю.І.</b> Нелінійна хвильова модель буксируваної системи та чисельний метод її розрахунку.....	102
<b>Bushuev S., Ivko A.</b> Framework model of syncretic management of innovative projects.....	112
<b>Stefanyshyn D.V.</b> Forecasting the design maxima water discharges of floods on the Latorica river according to the data of the Mukachevo gauging station using plotting position formulas.....	123
<b>Терентьєв О.М., Дуда В.О.</b> Інформаційно-аналітична система для дослідження впливу майнінгу криптовалют на викиди CO <sub>2</sub> .....	141
<b>Зінченко В.Л., Лифар В.О.</b> Інформаційна та математична модель процесів контролю стану квантового каналу зв'язку.....	151
<b>Зарудний О.Б.</b> Застосування інтелектуального аналізу еколого-економічних даних у системі пенсійного страхування та для прогнозування витрат на соціальний захист і соціальне забезпечення...	161
<b>Myrontsov M.</b> An example of the application of neural networks of a simple architecture to unfocused well electrometry probes.....	177
<b>ДО ВІДОМА АВТОРІВ</b> .....	183

## CONTENTS

### ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

<b>Petrushka I., Mokryy V., Dmytriv B.</b> Analysis of technologies of disposal and use fibrous paper skopje.....	5
<b>Osokina N.</b> Modern problems of Ukraine's ecology: agricultural pollutants and the quality of drinking water in the city of Kyiv.....	22
<b>Mehdiyeva N.Z.</b> Fertility indicators of soils in the Siyazan-Sumgayit massive	28
<b>Maikovykh V., Adamenko Y.</b> Assessment of the impact of construction waste generation on the environment.....	33
<b>Adamenko S., Arkhypova L.</b> Study of patterns of PM2.5 and PM10 changes in the atmospheric air of Ivano-Frankivsk region.....	47
<b>Mats A.</b> Study of the feature of the temperature regime of the Mykolaiv and region in the context of the issue of climate change.....	59

### CIVIL SAFETY

<b>Tsopa V., Yavorska O., Borysovska O., Cheberyachko L., Nehrii T.</b> The process of dangerous event management taking into account economic, environmental and occupational losses.....	72
<b>Sukach S., Chencheva O., Kozlovska T., Lashko Ye., Rieznik D., Tkachuk K.</b> Ensuring the normalization of the aero-ionic regime in production areas by means of ultrasonic air ionization.....	88

### INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

<b>Trofymchuk O., Lebid O., Kaliukh Iu.</b> Nonlinear wave model of towed system and numerical method for its calculation.....	102
<b>Bushuev S., Ivko A.</b> Framework model of syncretic management of innovative projects.....	112
<b>Stefanyshyn D.V.</b> Forecasting the design maxima water discharges of floods on the Latorica river according to the data of the Mukachevo gauging station using plotting position formulas.....	123
<b>Terentiev O., Duda V.</b> Information and analytical system for researching the impact of cryptocurrency mining towards CO <sub>2</sub> emissions.....	141
<b>Zinchenko V., Lyfar V.</b> Information and mathematical model of quantum communication channel state control processes.....	151
<b>Zarudnii O.</b> Usage of intellectual analysis of ecological-economic data in the pension insurance system and for forecasting expenditures on social protection and social security.....	161
<b>Myrontsov M.</b> An example of the application of neural networks of a simple architecture to unfocused well electrometry probes.....	177
<b>INFORMATION FOR AUTHORS</b> .....	183

# ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

УДК 662.818

**Ihor Petrushka**, D. S. (Engineering), Professor

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

**Volodymyr Mokryy**, D. S. (Engineering), Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-5160> **e-mail:** [volodymyr.i.mokryy@lpnu.ua](mailto:volodymyr.i.mokryy@lpnu.ua)

**Bohdan Dmytriv**, (Master's degree), Graduate student

**e-mail:** [bohdan.dmytriv1996@gmail.com](mailto:bohdan.dmytriv1996@gmail.com)

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

## ANALYSIS OF TECHNOLOGIES OF DISPOSAL AND USE FIBROUS PAPER SKOPJE

**Abstract.** *The article examines the current state and trends in the development of waste management technologies in the pulp and paper industry, with the aim of analyzing the reasons that hinder, and sometimes make impossible, the effective utilization of fibrous waste paper to obtain environmentally safe materials and raw products. The production of paper products is one of the most capital-intensive and energy-intensive industries, second only to the metallurgical and chemical industries, with a correspondingly large amount of waste and a negative impact on the environment. The technological processes of scum formation as a result of waste paper recycling and paper production wastewater treatment are considered and analyzed. Skopje is the final waste of the pulp and paper industry, which is formed at various stages of the paper and cardboard manufacturing process, therefore it is deposited in landfills. Multiton volumes of skopje require significant areas for its storage. Despite the low IV hazard class, this leads to serious environmental problems, as the leachate from the skopje landfill pollutes surface and ground water. Technologies of possible disposal and reuse of skopje, known in domestic and foreign literature, are described and analyzed. The technology of reusing scoop is determined by its relatively environmentally safe physicochemical composition. The indicated fibrous, mineral, extractive constituents and lignin determine the possibility of reusing skopje, mainly for the construction industry. The perspective of the complex use of multi-tonnage waste – slag, sludge, ash and slag of thermal power plants as plasticizers, fillers, binders and binding components in the production of building structural and heat-insulating materials is named. Technologies for using scapula as a filler in the production of building materials require a high content of inorganic compounds and a minimum amount of organic compounds. A high content of fibrous particles and a low content of mineral substances is necessary when using scapula in the production of composite wood composite materials. The specified technological limitations ensure only small amounts of skopje use in the production of building materials. The effectiveness of*

using skopje as an additive to the asphalt mixture for road construction and production of fuel materials is determined by the economic costs of transportation and dewatering. It is noted that the high humidity, ash content and low calorific value of scum are the main reason for the lack of effective technologies for its utilization. The solution to the problem is the use of low-energy technologies through the direct use of osprey as a component of the soil mixture for biological reclamation of man-made landscapes. The article substantiates an environmentally safe and socially favourable option for using a soil substrate based on osprey. It is emphasised that the humidity and organic viscosity of the plant origin of osprey form the agrotechnical properties of soil substrates of prolonged action, which ensure optimal technological efficiency of phytomelioration of degraded lands. The reclaimed areas will reduce greenhouse gas emissions from the soil, prevent wind and water erosion, and ensure the environmental safety of natural and man-made ecosystems.

**Keywords:** pulp and paper industry, waste, paper skopje, disposal technologies, reuse, environmental safety, reclamation.

**І.М. Петрушка, В.І. Мокрий, Б.А. Дмитрів**

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

## **АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВОЛОКНИСТОГО МАКУЛАТУРНОГО СКОПУ**

**Анотація.** У статті розглянуто сучасний стан та тенденції розвитку технологій управління відходами целюлозно-паперової галузі, з метою аналізу причин, що перешкоджають, а інколи й унеможливають ефективну утилізацію волокнистого макулатурного скопу для одержання екологічно безпечних матеріалів і сировинної продукції. Виробництво паперової продукції є однією з найбільш капіталозатратних та енергоємних галузей, поступаючись лише металургійній та хімічній промисловості, з відповідною великою кількістю відходів та негативним впливом на довкілля. Розглянуто та проаналізовано технологічні процеси утворення скопу внаслідок переробки макулатури та очистки стічних вод паперового виробництва. Скоп є остаточним відходом целюлозно-паперової промисловості, що утворюється на різних стадіях процесу виготовлення паперу та картону, тому складається на полігонах. Багатотоннажні обсяги скопу потребують значних площ для його складування. Незважаючи на невисокий IV клас небезпеки, це призводить до серйозних екологічних проблем, оскільки інфільтратом з полігону складування скопу забруднюються поверхневі та ґрунтові води. Описано та проаналізовано технології можливої утилізації та повторного використання скопу, відомі у вітчизняній та зарубіжній літературі. Технологічність повторного використання скопу визначається його відносно екологічно безпечним фізико-хімічним складом. Зазначені волокнисті, мінеральні, екстрактивні складові речовини та лігнін обумовлюють можливості повторного використання скопу, переважно для будівельної індустрії. Названо перспективність комплексного використання багатотоннажних відходів – скопу, мулу, золи і шлаку теплових електростанцій в якості пластифікаторів, наповнювачів, в'язучих і сполучних компонент при виготовленні будівельних конструкційно-теплоізоляційних матеріалів. Технології використання скопу в якості наповнювача при виробництві будівельних матеріалів потребують високого вмісту неорганічних і мінімальної кількості органічних сполук. При

використанні скопу у виробництві плитних деревинних композиційних матеріалів необхідний високий вміст волокнистих частинок та низький вміст мінеральних речовин. Вказані технологічні обмеження забезпечують лише незначні обсяги використання скопу у виробництві матеріалів будівельного призначення. Ефективність використання скопу в якості добавки до асфальтової суміші для дорожнього будівництва та виробництва паливних матеріалів визначається економічними затратами на транспортування та зневоднення. Зазначається, що висока вологість, зольність і низька теплотворність скопу є основною причиною відсутності ефективних технологій його утилізації. Розв'язком проблеми є використання технологій з низькими енергетичними затратами, шляхом прямого використання скопу в якості складової ґрунтосуміші для біологічної рекультивациі техногенних ландшафтів. Обґрунтовується екологічно безпечний і соціально сприятливий варіант використання ґрунтового субстрату на основі скопу. Наголошується, що вологість та органічна в'язкість рослинного походження скопу формує агротехнічні властивості ґрунтових субстратів пролонгованої дії, які забезпечують оптимальну технологічність фітомеліорації деградованих земель. Рекультивовані території зменшують викиди ґрунтом парникових газів, запобігатимуть вітровій та водній ерозії ґрунту, забезпечать екологічну безпеку природно-техногенних екосистем.

**Ключові слова:** целюлозно-паперова промисловість, відходи, макулатурний скоп, технології утилізації, повторне використання, екологічна безпека, рекультивациія.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.5-21>

## Постановка проблеми

Целюлозно-паперове виробництво (ЦПВ) України об'єднує близько 100 підприємств із виробництва паперу і картону та виробів з них, а разом з переробниками, трейдерами, посередниками, науковими, монтажними та спеціалізованими торговельними організаціями їх налічується понад 300. У галузі працює близько 30 тис. осіб, а на підприємствах галузі встановлено 72 паперо- та картоноробних машини, понад 80 гофроагрегатів, майже 50 підприємств мають обладнання з виготовлення зошитів та 10 – з виготовлення шпалер. Загальна встановлена потужність паперо- та картоноробних машин в Україні становить близько 1 млн тонн паперу і картону на рік [1]. У структурі виробництва паперу і картону переважають такі види, як картон тарний, папір для гофрування, картон коробковий, папір санітарно-гігієнічний.

Внаслідок діяльності ЦПВ утворюється значна кількість відходів, які спричиняють негативний вплив на навколишнє середовище [2, 3]. З огляду на це, важливим залишається дослідження сучасного стану та тенденцій розвитку технологій управління відходами целюлозно-паперової галузі з метою виявлення та аналізу причин, що перешкоджають, а інколи й унеможливають ефективне повторне використання відходів, та вибору оптимального способу їх утилізації.

Головною причиною утворення великої кількості відходів та незначних обсягів їх повторного використання, крім фізичної та моральної застарілості основних фондів багатьох картонно-паперових підприємств, є обладнання, що працює понад 50 років, робочий стан якого підтримується переважно за



рахунок відновлювального ремонту та модернізації і рідше – шляхом заміни зношеного обладнання, та сировинна база, що спонукає орієнтуватися на випуск таких видів паперу і картону та виробів з них, які виробляються з вторинного волокна – макулатури.

У процесі виробництва картону та паперу утворюються відходи від розпуску макулатури, очистки макулатурної маси, очистки стічних вод, паперової, картонної, гофротарної продукції тощо. Ці відходи в залежності від їх виду підлягають своєчасному видаленню з проммайданчиків, зберіганню в спеціально відведених місцях, утилізації чи захороненню на полігонах промислових відходів.

Відомо, що целюлозно-паперова галузь надзвичайно водоемна – в середньому на 1 т паперу витрачається до 60 м<sup>3</sup> води [4]. Важливо зазначити, що стічні води підприємств (особливо картонних і паперових) завжди волокновмісні, тому технологічна схема з їх очистки проектується таким чином, щоб забезпечувалось вилучення сторонніх речовин і сполук, зокрема і волокон рослинних полімерів для відповідності стоків встановленим рівням ГДК. Однією зі сполук, що вилучаються з очисних споруд, є волокнистий скоп. Встановлено, що значний обсяг картонно-паперових відходів (зокрема, скопу волокнистого макулатурного) не підлягає переробці чи утилізації, а тому розміщується на полігонах. У середньому, за рік на полігони України потрапляє 51815,404 т волокнистого скопу [2].

Тому, актуальним завданням технологій захисту довкілля є пошук та вибір ефективних способів утилізації багатотоннажних відходів ЦПВ – макулатурного волокнистого скопу. Оптимальне використання скопу сприятиме здешевленню основної продукції, збереженню природних ресурсів, зменшить техногенне навантаження на довкілля.

**Мета дослідження** – систематизація технологій утилізації та повторного використання скопу для одержання екологічно безпечних матеріалів та сировинної продукції.

## **Виклад основного матеріалу**

**1. Технології та обсяги утворення скопу.** Сучасне ЦПВ України умовно можна розподілити на дві групи виробництв, відповідно до типів сировини, яка використовується. Відповідно, відходи ЦПВ поділяються на відходи виробництва целюлози та відходи виробництва паперу і картону та виробів з них.

Роль першої групи (целюлозної промисловості) полягає у створенні повноцінної сировини для галузі – целюлози. Основою для виробництва целюлози слугує деревина як хвойних, так і листяних порід. Основні способи переробки деревини в целюлозу – сульфатний процес і сульфітна варка. Виробничі потужності з випуску целюлози високого виходу (напівцелюлози) та деревної маси мають лише ВАТ «Жидачівський целюлозно-паперовий комбінат», ВАТ «Ізмаїльський целюлозно-картонний комбінат» та ВАТ «Луцький картонно-рубериодний комбінат», що виробляють ці напівфабрикати виключно для забезпечення власних потреб.

Відходи целюлозної промисловості утворюються внаслідок технологічних процесів виробництва целюлози в Україні, що, як правило, зводиться до наступних етапів: заготовки деревини хвойних та листяних порід дерев;

переробки деревини в технічну щепу; варіння целюлози; приготування хімічних реагентів та їх регенерація з подальшим повторним використанням; очистки стічних вод промисловості. Загалом, на промислових полігонах України внаслідок діяльності підприємств целюлозної галузі протягом 2018 р. складовано 10679,191 т промислових відходів [2].

Роль другої групи (картонно-паперової промисловості) полягає у повторному використанні полімерної сировини як альтернативи целюлозі – макулатури (вторинного рослинного волокна). Переробкою макулатури в Україні займаються ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат», ТОВ «Понінківська картонно-паперова фабрика – Україна», ПрАТ «Малинська паперова фабрика – Вайдманн», ПрАТ «Картонно-Паперова Компанія», ТОВ «Дніпропетровська паперова фабрика», АТ «Кохавинська паперова фабрика» та інші підприємства.

На відміну від целюлозної промисловості, картонно-паперова орієнтована на переробку вторинної сировини, що обумовлює утворення більшої кількості відходів виробництва, в порівнянні з першою групою підприємств. Головною особливістю вторинної сировини є те, що вона, щонайменше один раз, пройшла повний цикл переробки. Відомо, що переробка макулатури характеризується частковою утратою папероутворювальних властивостей, що проявляється у скороченні волокон, зниженні здатності до набухання, частковій втраті еластичності тощо. Звідси випливає неможливість переробки вторинної сировини нескінченну кількість разів. Загальна технологічна схема переробки макулатури на підприємствах другої групи представлена у роботі [7]. З відходоутворювальної точки зору у картонно-паперовому виробництві найбільш важливе значення мають два взаємопов'язані процеси: процес переробки макулатури; процес очистки стічних вод. При аналізі з відходоутворювальної точки зору типової для України технологічної схеми водоочистки стічних вод підприємств другої групи встановлено причини утворення скопу (рис. 1).

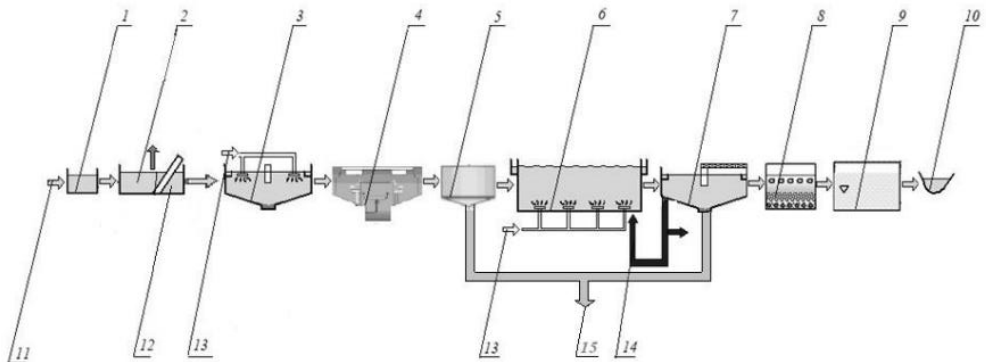


Рис. 1. Загальна технологічна схема очистки стічних вод підприємств картонно-паперової промисловості: 1 – вода на очистку; 2 – барабанна решітка; 3 – первинний відстійник або усереднювач з турбоаераторами; 4 – коагулятор; 5 – флотатор; 6 – аеротенк; 7 – вторинний відстійник; 8 – фільтр; 9 – знезаражувач води; 10 – водойма або повторне водокористування (для замкненого циклу); 11 – стоки на очистку; 12 – грубе сміття; 13 – повітря; 14 – активний мул; 15 – вологий волокнистий скоп

Очищення води починається на комплексі решіток барабанного типу. На цьому етапі затримується крупне сміття, що включає: залишки клейкої стрічки – 22,658 т/рік; залишки плівки – 211,52 т/рік [3]. Комплекс із первинного відстійника та коагулятора затримує та відокремлює шлам фарб, що містять галогенові розчинники, фарб на водяній основі, фарб, що не містять галогенові розчинники, та затверділих друкарських фарб сумарно в кількості 74,584 т за 2018 рік [3].

Комплекс із аеротенка з вторинними відстійниками забезпечує повну біологічну очистку стічних вод підприємств целюлозно-паперової галузі за рахунок роботи активного мулу. Протягом 2018 року, відповідно до даних [3], утворено та вивезено на промислові полігони 122,9 т надлишкового активного мулу.

Комплекс флотаційних установок у зв'язці із вторинними відстійниками забезпечує відокремлення волокон рослинних полімерів зі стічних вод, що надходять на очистку. Внаслідок роботи комплексу протягом 2018 року за даними [3], утворено 55436,132 т волокнистого скопу, накопиченого на очисних спорудах.

Отже, враховуючи вищезазначене, найбільші обсяги відходів картонно-паперової промисловості, що не можуть бути утилізовані чи використані повторно та підлягають своєчасному видаленню з виробничих майданчиків і вивезенню та складуванню на полігонах промислових відходів, складають: волокнистий скоп – 55436,132 т/рік; відходи очищення стічних вод – 8361,43 т/рік; непровар – 2194,861 т/рік; залишки та шлам фарб, зокрема друкарських – 972,968 т/рік.

Встановлено, що волокнистого скопу за рік утворюється в п'ять разів більше аніж інших вищезазначених відходів разом взятих. Його обсяги зростають у разі використання макулатури низької якості як складової паперової композиції. Кількість відходів у такому випадку може становити до 20% від маси вихідної сировини [18].

Прийнято вважати, що волокнистий скоп є поєднанням трьох складових частин: волокнистої, мінеральної та нерозчинної [8]. До волокнистої частини відноситься целюлоза та геміцелюлоза, до мінеральної – мінеральні речовини, домішки, хімічні сполуки тощо, до нерозчинної – лігнін та екстрактивні речовини (табл. 1).

Таблиця 1. Хімічний склад скопу

Компонент	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO
Вміст, %	25,00	16,20	7,27	28,80	0,30	0,24	1,65

Целюлоза у скопі – це якісне волокно, в якому, проте, міститься велика кількість дрібного волокна та його обривків, що суттєво відображається на якості паперу та картону. Геміцелюлоза – складні полісахариди, молекули яких містять пентози, гексози, а також уронові кислоти. Лігнін – компонент зі складним хімічним складом, що заповнює простір між волокнами целюлози, таким чином забезпечуючи міцність скопу та його нерозчинність у воді. Екстрактивні речовини у скопі представлені сумішшю ароматичних з'єднань, а мінеральні речовини – в основному карбонатом кальцію [8].

Склад волокнистого скопу визначається видом вторинної сировини, що переробляється. Оскільки часто макулатура являє собою різні співвідношення паперу з картоном, що переробляються підприємствами другої групи, то і скоп в результаті отримується з різним співвідношенням складових (табл. 2). До хімічного складу скопу входять такі компоненти: целюлоза (48%), лігнін (24%), геміцелюлоза (24%), екстрактивні речовини (3,5%), мінеральні речовини (0,5%).

Таблиця 2. Склад волокнистого скопу, що утворюється внаслідок переробки макулатури на підприємствах картонно-паперової промисловості

Назва компоненту	ПрАТ «Київський КПК», вміст, % [9]	АТ «Кохавинська ПФ», вміст, % [10]	ТОВ «Понінківська КПФ – Україна», вміст, % [11]	Середній склад волокнистого скопу, %
Целюлоза	49	47	48	48
Геміцелюлоза	23	25	22	23
Лігнін	24	24	26	25
Екстрактивні речовини	3,6	3,4	3,5	3,5
Мінеральні речовини	0,4	0,6	0,5	0,5

Згідно з [9] відомо, що серед підприємств, що займаються переробкою макулатури в Україні, ПрАТ «Київський КПК» переробляє не менше 30% макулатури, при цьому утворюючи та розміщуючи на промисловому полігоні щонайменше 18 478,526 т волокнистого скопу в рік. АТ «Кохавинська ПФ» переробляє не менше 14% макулатури, утворюючи та розміщуючи на власному промисловому полігоні щонайменше 7 761,05 т волокнистого скопу в рік. ТОВ «Понінківська КПФ – Україна» переробляє не менше 6% макулатури, відповідно утворюючи та розміщуючи на власному промисловому полігоні щонайменше 3 326,17 т волокнистого скопу в рік.

Відповідно до висновків державної санітарно-епідеміологічної експертизи [10–12] скоп волокнистий макулатурний, що утворюється на підприємствах, відповідає встановленим медичним показникам та критеріям безпеки та має склад, представлений у табл. 1. Проаналізувавши склад волокнистого скопу, що утворюється внаслідок очистки стічних вод трьома підприємствами другої групи, на які разом припадає 50% виробничих потужностей з переробки макулатури, встановлено, що вміст основних компонентів скопу знаходиться у близьких межах (табл. 2). Склад скопу залежить від типу використовуваного паперу, кількості і видів ступенів очищення.

Незважаючи на невисокий IV клас небезпеки, поводження з даним відходом на підприємствах обтяжливе, викликає нарікання регіональних адміністративних органів, екологічних служб та громадськості. Макулатурний скоп, великотоннажний відхід виробництва паперу та картону, давно є проблемою виробників картонно-паперової галузі. Постійне вдосконалення технології паперу та картону і спроби рециклінгу скопу в технологічному процесі не дозволяють повністю уникнути його утворення та накопичення. Способи класифікації, напрями утилізації та повторного використання скопу та волокнистого шламу ЦПВ наведено у роботах [5, 6].

**2. Технології утилізації скопу.** Через багатотоннажні обсяги волокнистого скопу, що утворюються внаслідок переробки макулатури і в результаті займають значні площі придатної для провадження інших видів діяльності землі, вітчизняними та зарубіжними вченими галузі активно розробляються способи та методи утилізації макулатурного скопу (рис. 2).

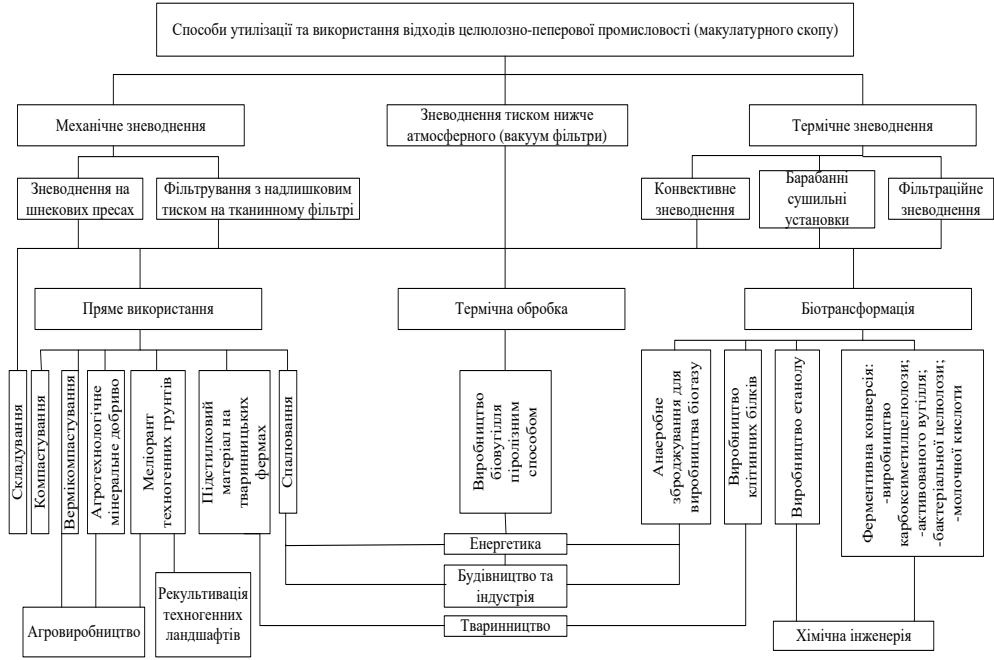


Рис. 2. Способи утилізації волокнистого макулатурного скопу

Найбільш поширеним способом утилізації скопу є його складування. Проте, такий спосіб призводить до серйозних екологічних проблем, які виникають внаслідок проникнення в ґрунт рідкої фази з відходів, особливо коли звалища розташовані на відносно проникних ґрунтах. Волокнистий скоп, що виділяється після очистки стічних вод підприємств другої групи, являє собою осад сірого кольору з вологістю понад 80% [14]. Як наслідок, інфільтратом з полігону складування скопу забруднюються поверхневі та підземні ґрунтові води, які є джерелом питної води [13]. Макулатурний скоп є незручним відходом через його високу вологість, а складування вимагає значних площ.

Для зменшення площ складування скопу на полігонах його зневоднюють. Завдяки процесу зневоднення на шнекових пресах, в кінцевому результаті скоп являє собою осад з масовою часткою сухої речовини в межах 40% і зберігається у спеціально відведених місцях. Ще одним популярним і широко застосовуваним методом зневоднення вологого волокнистого скопу є фільтрування через тканинний фільтр [15], що полягає у затриманні волокна целюлози, навіть найкоротшого, на тканині, що одночасно пропускає молекули води. Таким чином скоп відділяється від надлишкової вологи. Вищезазначені способи зневоднення волокнистого скопу, а також зневоднення за допомогою вакуум-фільтрів, центрифуг відносяться до механічних. Крім того, існують термічні способи зневоднення скопу за допомогою

конвективних та барабанних сушильних установок. При зневодненні щільність скопу зростає і, відповідно, даний тип відходів умовно займає менше місця.

У ЦПВ спостерігається багаторічна традиція спалювання відходів. Цей варіант утилізації шламу широко використовується для виробництва електроенергії [16, 22]. Проте, скоп має низьку ефективність згоряння, збільшує концентрацію забруднення повітря та потребує високого інвестиційного капіталовкладення [13]. Авторами [23] встановлено, що золошлакові відходи від спалювання макулатурного скопу мають в'язучі властивості, утворюють тверднучі системи і можуть використовуватися як додатковий цементуючий матеріал у будівництві. Розроблено технологію утилізації, що передбачає консервацію скопу негашеним вапном із подальшим формуванням із портландцементом та золою. Вироби на основі таких компонентів дають змогу рекомендувати їх після додаткових апробаційних досліджень як теплоізоляційні матеріали.

Потенційні можливості утилізації скопу шляхом біотрансформування для виготовлення етанолу, карбоксиметилцелюлози, активованого вугілля і молочної кислоти розглянуті в роботі [13]. Також скоп є придатною сировиною для анаеробного зброджування з метою отримання біогазу. Авторами роботи [16] продемонстровано можливість біотрансформації скопу в рідкі нафтопродукти для рекуперації енергії, шляхом прямого зрідження у гарячій стиснутій воді. Згідно з даними [18], скоп може слугувати сировиною для виготовлення бактеріальної целюлози та ферментів, шляхом його послідовної ферментації. Розглянуто застосування скопу як перспективного субстрату для виробництва клітинних білків для використання в кормах тварин. Також в тваринництві можливе використання скопу в якості підстилки, але попередньо його зневоднивши.

Перспективним способом утилізації скопу є його термічне розкладання, внаслідок якого утворюється біовугілля. Біовугілля містить високу частку мінералів, які є цінним джерелом поживних речовин. Його застосовують для підвищення родючості ґрунтів, що сприяє збільшенню продуктивності сільського господарства. В аграрному секторі скоп може використовуватися як добавка до ґрунтів (меліорант) для покращення їх якості і навіть як органіко-мінеральне добриво для покращення врожайності як у чистому вигляді, так і в суміші з іншими компонентами [24]. Проте, існує необхідність у подальших дослідженнях властивостей скопу для використання в аграрній сфері. Вони включають аналіз різних способів попередньої обробки скопу, різних норм внесення в ґрунт та комбінації з іншими органічними й мінеральними добривами, для забезпечення екологічної чистоти продукції агровиробництва.

**3. Технології повторного використання скопу.** Окрім різних способів утилізації скопу, останнім часом все більше приділяється увага його повторному використанню (рис. 3). Цінність скопу полягає не тільки в його екологічній чистоті та теплоенергетичному потенціалі (він здатен горіти в сухому стані), але і в більшій мірі зумовлена його матеріальною складовою. Йдеться про 50% глинистої сировини – каоліну, що є цінною природною сировиною. За такого складу ці відходи можна використати як вторинну сировину для виготовлення різних композитів. Промислові можливості повторного використання скопу розділяються на дві категорії: ті, що потребують високого вмісту неорганічних і мінімальної кількості органічних

сполук, інші – високого вмісту волокна та низького вмісту мінеральних речовин. При використанні шламу у виробництві деревинних композиційних матеріалів важливе значення має високий вміст волокнистих частинок, при виготовленні будівельної продукції – наповнювачів, а при виготовленні покрівельних матеріалів має значення високий вміст волокна та наповнювачів.

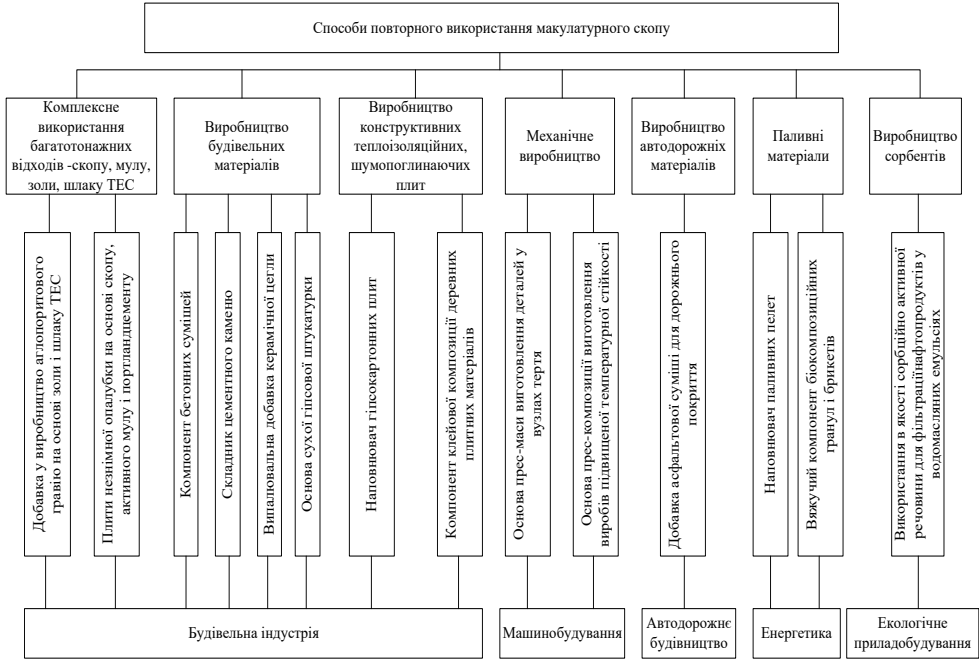


Рис. 3. Способи повторного використання волокнистого макулатурного скопу

Повторне використання скопу для виробництва паперу і картону має певне обмеження. Введення дрібного волокна до складу паперової чи картонної композиції істотно погіршує фізико-механічні показники товарної продукції [19]. Тому скоп може використовуватися при виготовленні яєчних, фруктових лотків, промислової пакувальної продукції, одноразових виробів, призначених для громадського харчування тощо. Відома практика використання скопу при виробництві картону, який виготовляється із 100% переробленого волокна [13].

Наявні розробки у сфері поводження з відходами ЦПВ показують перспективність використання скопу для виробництва матеріалів будівельного призначення. Великі обсяги і дешевизна скопу є вагомим аргументом його використання в якості замітника деяких традиційних добавок при виробництві будівельних матеріалів. У виробництві будівельних матеріалів скоп може повторно використовуватись як у ролі в'язучого компонента, так і в ролі наповнювача.

Використовуючи скоп в якості компонента бетонних сумішей, при поєднанні з порцандцементом можна одержати композиційні матеріали, придатні для виготовлення будівельних блоків, стінових панелей тощо. Зола макулатурного шламу є цінною сировиною для виробництва цементу та цементної продукції, оскільки містить у своєму складі велику частку діоксиду

кремнію, алюмінію та карбонату кальцію. Однак, вміст шламу в композиції не має перевищувати 10%, оскільки його збільшення призводить до зниження механічної міцності композитів. У роботі [20] досліджувалася можливість використання золи шламу для часткової заміни цементу при виготовленні нового виду бетону.

Як наповнювач скоп можна використовувати також у виробництві конструкційно-теплоізоляційного легкого бетону (скопобетон), на основі якого можна виготовляти стінові блоки класом не менше В 12,5, теплопровідністю 0,15 Вт/(м·К) і морозостійкістю до F 35. Витрату портландцементу для виготовлення скопобетонних блоків можна довести до 200 кг/м<sup>3</sup> [19].

У будівництві скоп застосовують як компонент бетонних сумішей, випалювальну добавку у виробництві керамічної цегли, основу сухої гіпсової штукатурки, компонент волокнистих та напівтвердих волокнистих плит [13].

Макулатурний скоп може застосовуватись при виготовленні керамічних матеріалів (цегли). Однак, на основі проведених досліджень було зроблено висновок про те, що наявність шламу у композиціях для виготовлення керамічної цегли призводила до погіршення механічних властивостей виробів, нестабільності форми та розмірів матеріалу. Єдиним позитивним результатом було те, що зменшувалась щільність матеріалу [13].

Широко представлені можливості одержання конструктивних, теплоізоляційних та шумопоглинаючих плит на основі скопу. Скоп у матеріалі виступає як органічна композиційна складова, що має в'язучу здатність, і як волокнистий армуючий компонент. В'язуча здатність скопу обумовлена його хімічною будовою та адгезійними властивостями. У процесі затвердіння скоп проявляє властивості в'язучого контактного твердіння, до яких відносяться також в'язучі аморфної і нестабільної кристалічної структури, здатні конденсуватися в момент виникнення контактів між частинками під час наближення їх на відстань дії поверхневих сил притягання. Наявність у системі лігніну також призводить до утворення жорстких зв'язків між волокнами, що посилює зв'язуючий ефект.

Вже наявні в цій галузі напрацювання показують можливість використання скопу для виробництва гіпсоволокнистих плит як наповнювача, замість паперової макулатури [21]. При виготовленні гіпсокартону волокнисті частинки шламу покращують механічні властивості матеріалу, забезпечують йому пористу структуру та низьку щільність. Проте, можуть негативно впливати на вогнестійкість.

Скоп можна використати для виробництва теплоізоляційних волокнистих плит із застосуванням як органічних, так і неорганічних в'язучих. Розроблений склад для виготовлення теплоізоляційних матеріалів, що містять скоп 60...90%, спучений перліт 8...20%, фтористий натрій 0,5...2,5% і в'язуче – продукт сумісної нейтралізації ортофосфорної кислоти, карбаміду, формаліну 1...12%. Також наведено можливість застосування як в'язучих глини, фторангідритового в'язучого. Застосування цього складу у виробництві теплоізоляційного матеріалу підвищує механічну міцність і знижує займість матеріалу. Теплоізоляційні плити на основі скопу мають теплопровідність 0,063...0,087 Вт/(м·К) [19, 21].

Скоп можна використовувати у виробництві напівтвердих волокнистих плит. Українським науково-виробничим об'єднанням целюлозно-паперової



промисловості отримано склад для виготовлення волокнистих плит, що містять осад стічних вод картонно-паперового виробництва до 85% і макулатурні волокна [21].

При виготовленні таких деревинних композиційних матеріалів, як стружкова плита, MDF, волокниста плита, скоп може використовуватись в якості наповнювача в поєднанні з первинним макулатурним шламом. Результати досліджень щодо використання шламу при виготовленні таких матеріалів довели, що застосування його є можливим при обґрунтованому процентному співвідношенні щодо інших компонент композиції для отримання матеріалу із задовільними властивостями. Первинний шлам, який додається в суміш композиції, має значення армувального компонента, оскільки містить велику кількість волокнистих частинок. Скоп може додаватися як співполімер до клейової композиції, оскільки містить в своєму складі білок. При виготовленні композитів первинний шлам може змішуватися з макулатурним скопом [13].

Заслужують уваги технології комплексного використання багатотоннажних відходів – скопу, мулу, золи, шлаку ТЕС. Запропоновано теплоізоляційні матеріали на основі скопу та активного мулу. Мул так само, як і скоп, належить до багатотоннажних відходів целюлозно-паперової промисловості. Активний мул може бути пластифікатором для дисперсних систем на основі в'язучих речовин і сполучним компонентом у сумішах з органічних волокон. Розглянуто технології виготовлення конструкційно-теплоізоляційних матеріалів, таких як плити незнімної опалубки на основі скопу і портландцементу [6].

У роботі [11] розроблено концепцію технології спільної утилізації золи, що утворюється внаслідок спалювання вугілля на ТЕС, та скопу з утворенням конструктивно-теплоізоляційного виробу. Встановлено, що суміш, яка складається з 60% золи, 20% цементу, 10% волокнистого скопу та 10% негашеного вапна, може бути віднесена до групи конструкційно-теплоізоляційних матеріалів та використовуватись в якості будівельного матеріалу при укладанні підлоги та плоскої покрівлі через міцність на стиск більше 6 МПа [11].

Використання вторинної сировини та промислових відходів є одним з найбільш ефективних напрямків ресурсозбереження у виробництві будівельних матеріалів. Економічно та екологічно вигідним методом переробки макулатурного скопу є додавання у виробництво аглопоритового гравію на основі золи ТЕС. Маючи невисоку густину, високі сорбційні властивості й пластичність, він здатний покращити умови грудкування зольної шихти й підвищити міцність як вологих, так і сухих сирцевих гранул. На його основі можна одержати, зокрема, легкі бетони.

Виробництво виготовлення паливних пелет зі скопу запропоновано авторами [17]. Для підвищення ефективності виробництва, зберігання, транспортування та спалювання, в роботі [22] розглянута можливість виробництва паливних біокомпозитних гранул і брикетів на основі волокнистого скопу, що використовується в якості в'язучого компонента. Суть технології полягає у вивільненні зі скопу чистого лігніну під високим тиском (понад 90 МПа), що зв'язує наповнювач брикету, в ролі якого виступає переважно тирса, стружка, дрібнодисперсне вугілля тощо.

Скоп може використовуватись як добавка в асфальтову суміш для дорожнього покриття [25]. Волокнисті добавки сприяють зменшенню шуму, забезпечують підвищене зв'язування, еластичність і довговічність тротуарів, велосипедних доріжок, спортивних майданчиків, теренкурових алей та екологічних стежок в парках.

Використання скопу в якості сорбційно-активної речовини можливе у різних технологіях очищення газових і рідинних потоків від шкідливих компонентів, що забруднюють довкілля. В [6] обговорюються можливості використання фільтраційних властивостей скопу по відношенню до нафтопродуктів, що містяться у складі водомасляних емульсій. Адсорбція, що здійснювалась в лабораторній фільтраційній установці шляхом пропускання водомасляної емульсії з нафтопродуктами через заповнені подрібненим у порошок та попередньо просушеним в сушильній шафі при 110<sup>0</sup>С протягом 250 хв волокнистим скопом колонки, забезпечила зниження концентрації нафтопродуктів з початкових 4170 мг/л до 279 мг/л, тобто ефективність очистки склала 93,3%. Проте, використання волокнистого скопу в якості адсорбенту має ряд суттєвих недоліків, серед яких: низька швидкість протікання водомасляної емульсії з нафтопродуктами через шар адсорбенту; відсутність технології регенерації адсорбенту. Таким чином, спостерігаємо трансформацію скопу, як відходу очистки стічних волокновмісних вод підприємств картонно-паперової промисловості, у відходи очистки стоків від нафтопродуктів, що через відсутність технології утилізації (регенерації) підлягає розміщенню на полігоні. Отже, використання скопу в якості адсорбенту є перспективним напрямком, проте сучасний рівень розвитку науки не дозволяє вирішити проблему заповнення скопом промислових полігонів за допомогою запропонованої ідеї.

В машинобудуванні скоп може використовуватись для виготовлення деталей. У роботі [19] розроблено прес-масу на основі скопу для виготовлення деталей у вузлах тертя, що працюють без мастила, а також – прес-композицію на основі скопу для виготовлення виробів, що працюють за підвищених температур.

## **Висновки і пропозиції**

Дослідивши та проаналізувавши інформацію про існуючі способи утилізації макулатурного скопу, можна констатувати факт відсутності на даний момент дійсно ефективної та економічно доцільної технології його переробки. Найбільш широко у науковій літературі представлені технології можливого використання скопу як волокнистого наповнювача в незначних кількостях для виробництва деревинних і будівельних композиційних матеріалів. Технологічно перспективний термічний розклад скопу в широко використовуваному обладнанні піролізних установок для виробництва біовугілля. Отримане в процесі карбонізації скопу біовугілля може мати широкий діапазон застосування в більш ніж 50 галузях промисловості (сільське господарство, виробництво добрив, косметика, фармацевтична промисловість).

Висока відносна вологість, зольність і, як наслідок, низька теплотворність макулатурного скопу є основною причиною відсутності на сьогоднішній день ефективних технологій його утилізації. Розв'язком проблеми ефективної утилізації макулатурного скопу є використання технологій з низькими енергетичними затратами.

Агротехнологічне використання скопу можливе, але потребує суттєвих уточнень технічних можливостей та ефективності. Врахування стану конкретних ґрунтів, кліматичних зон та фізико-хімічних властивостей скопу від конкретного виробника обов'язкове при вирощуванні сільськогосподарської продукції.

Найбільш перспективною є технологія прямого використання скопу в якості складової ґрунтосуміші для біологічної рекультивації техногенних ландшафтів. Висока відносна вологість та органічна в'язкість рослинного походження скопу забезпечують оптимальну технологічність його використання для ґрунтових субстратів. Основні агротехнічні властивості ґрунтосуміші пролонгованої дії на основі скопу забезпечать ефективність озеленення техногенних земель. Рекультивація кар'єрів, териконів, хвостосховищ, відвалів золи і шлаку, з використанням субстратів на основі скопу, може зменшити викиди ґрунтом парникових газів, зменшити вимивання поживних речовин, зменшити потреби в зрошенні та добривах рослин деградованих земель.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Офіційний сайт Державної служби статистики України. Електронний ресурс: <http://www.ukrstat.gov.ua>
2. Утворення відходів за класифікаційними угрупованнями державного класифікатора відходів у 2020 р. Електронний ресурс: [https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/uv\\_zaklass/arch\\_uv\\_zaklass\\_u.htm](https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/uv_zaklass/arch_uv_zaklass_u.htm)
3. Утворення відходів за класифікаційними угрупованнями державного класифікатора відходів у 2018 р. Електронний ресурс: [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/uv\\_zaklass/uv\\_zaklass\\_18u.xls](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/uv_zaklass/uv_zaklass_18u.xls)
4. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 р. Міністерство екології та природних ресурсів України. Електронний ресурс: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>
5. Шепелюк І.Р. Класифікація целюлозно-паперового шламу, шляхи його утилізації та можливості використання. Науковий вісник НЛТУ України, Вип. 25.5, 2015, С. 204-210.
6. Шепелюк І.Р., Шепелюк О.О., Лютий П.В. Напрями використання скопу целюлозно-паперового виробництва. Науковий вісник НЛТУ України, №24(9), 2014, С. 171-174.
7. Примаков С.П., Барбаш В.А. Технологія паперу і картону: навчальний посібник, Київ, ЕМКО, 2008, 425 с.
8. Новосад П.В., Челядин Л.І., Челядин В.Л. Теплоізоляційні матеріали на основі техногенних відходів. Теорія і практика будівництва : зб. наук. праць, № 655, 2009, С. 208-213.
9. Бондар О.І., Байрак О.М. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2015 році. Міністерство екології та природних ресурсів України. Київ, 2017, 308 с.
10. Скоп волокнистий макулатурний: Висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи від 07.06.2019 №12.2-18-1/12489. Звіт Держсанепідслужби України, 2019, С. 149-151.
11. Скоп волокнистий макулатурний: Висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи від 19.02.2019 №12.2-18-1/29396. Звіт Держсанепідслужби України, 2019, С. 398-399.

12. Скоп волокнистий макулатурний: Висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи від 17.09.2017 №602-123-20-3. Звіт Держсанепідслужби України, 2018, С. 655-656.
13. Bajpai P. Management of Pulp and Paper Mill Waste. Switzerland, Springer International Publishing, 2015, 193 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11788-1>
14. Tachtuiev B.G. Recycling of paper and board industry waste. Ukrainian Research Institute of Paper. №17(89), 2010, P. 18-23.
15. Гомеля М.Д., Іваненко О.І., Шаблій Т.О. Практичний посібник з курсу «Промислова екологія» для студентів спеціальності 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування», Київ, НТУУ «КПІ», 2010, 48 с.
16. Xu C., Lancaster J. Conversion of secondary pulp/paper sludge powder to liquid oil products for energy recovery by direct liquefaction in hot-compressed water. Water Research. № 42(6-7), 2008, P. 1571-1582. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.11.007>
17. David P.K. Converting paper, paper mill sludge and other industrial wastes into pellet fuel. Tappi Press, USA, 1995, P. 365-367.
18. Cavka A., Guo X., Tang S.J., Wenstrand S., Jonsson L.G., Feng Hong F. Production of bacterial cellulose and enzyme from waste fiber sludge. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, № 6, 2013, P. 1-10. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-25>
19. Мазепа Ю.В., Семінський О.О., Рябцев Г.Л. Екологічні способи перероблення вологого осаду стічних вод целюлозно-паперового виробництва. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження : зб. наук. праць. № 2(6), 2010, С. 72-75.
20. Ahmad S., Iqbal Malik M., Bashir Wani M., Ahmad R. Study of concrete involving use of waste paper sludge ash as partial replacement of cement. IOSR Journal of Engineering. Vol. 3, № 11, 2013, P. 6-15. <http://dx.doi.org/10.9790/3021-031130615>
21. Баталін Б.І., Козлов І. Будівельні матеріали на основі скопу – відходу целюлозно-паперової промисловості. Будівельні матеріали : зб. наук. праць. № 1. 2004, С. 42-43.
22. Бать Р.Я., Мальований М.С. Технологія створення біокомпозиції на основі відходів лісової та целюлозно-паперової промисловості. Науковий вісник НЛТУ України, №16(2), 2006, С. 86-88.
23. Sobol K., Solodkyu S., Petrovska N., Belov S., Hunyak O., Hidei V. Chemical Composition and Hydraulic Properties of Incinerated Wastepaper Sludge. Chemistry & Chemical Technology. Vol. 14, № 4, 2020, P. 538–544. <https://doi.org/10.23939/chcht14.04.538>
24. Романенко Т.Б., Зіновчук Н.В. Перспективи використання побічних продуктів картонно-паперового виробництва в сільському господарстві. Збалансоване природокористування, № 3, 2021, С. 96-102. DOI: 10.33730/2310-4678.3.2021.247144
25. Hidei V., Sidun Iu., Hunyak O., Stanchak S., Bidos V. Application of Thermoactivated Wastepaper Sludge Ash as Mineral Powder for Hot Asphalt Concrete Mix. Journal Theory and Building Practice, Volume 2, Number 2, 2020, P. 42-47, DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2020.02.042>

*Стаття надійшла до редакції 10.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 21.08.2024*

## REFERENCES

1. Official website of the State Statistics Service of Ukraine. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua> [in Ukrainian].
2. Waste generation by classification groups of the state waste classifier in 2020. Retrieved from [https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/uv\\_zaklass/arch\\_uv\\_zaklass\\_u.htm](https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/uv_zaklass/arch_uv_zaklass_u.htm) [in Ukrainian].

3. Generation of waste by classification groups of the state waste classifier in 2018. Retrieved from [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/uv\\_zaklass/uv\\_zaklass\\_18u.xls](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/uv_zaklass/uv_zaklass_18u.xls) [in Ukrainian].
4. National report on the state of the natural environment in Ukraine in 2021. Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> [in Ukrainian].
5. Shepelyuk, I.R. (2015). Classification of Pulp and Paper Sludge, the Way of its Utilization and the Possibility of Using. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 25.5, 204-210 [in Ukrainian].
6. Shepelyuk, I.R., Shepelyuk, O.O., Saldan, R.I., & Lyutyj, P.V. (2014). Some Directions for Use Skopje Pulp and Paper Production. *Scientific Bulletin of National Technical University of Ukraine*, 24(9), 171-174 [in Ukrainian].
7. Primakov, S.P., & Barbash, V.A. (2008). Technology of paper and cardboard: a study guide, Kyiv: EMKO [in Ukrainian].
8. Novosad, P.V., Chelyadyn, L.I., & Chelyadyn, V.L. (2009). Thermal insulation materials based on man-made waste. *Theory and practice of construction: collection. of science works*, 655, 208-213 [in Ukrainian].
9. Bondar, O.I., & Bayrak, O.M. (2017). National report on the state of the natural environment in Ukraine in 2015. Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. Kyiv [in Ukrainian].
10. Fibrous waste paper carp: Conclusion of the state sanitary-epidemiological examination dated 06.07.2019 No. 12.2-18-1/12489. Report of the State Sanitation Service of Ukraine, 2019, P. 149-151 [in Ukrainian].
11. Fibrous waste paper skunk: Conclusion of the state sanitary-epidemiological examination dated February 19, 2019 No. 12.2-18-1/29396. Report of the State Sanitation Service of Ukraine, 2019, P. 398-399 [in Ukrainian].
12. Fibrous waste paper skunk: Conclusion of the state sanitary-epidemiological examination dated September 17, 2017 No. 602-123-20-3. Report of the State Sanitation Service of Ukraine, 2018, P. 655-656 [in Ukrainian].
13. Bajpai, P. (2015). Management of Pulp and Paper Mill Waste. Switzerland: Springer International Publishing, 193 p. DOI 10.1007/978-3-319-11788-1
14. Tachtaiev, B.G. (2010). Recycling of paper and board industry waste. *Ukrainian Research Institute of Paper*, 17(89), 18-23.
15. Gomelya, M.D., Ivanenko, O.I., & Shablii, T.O. (2010). Practical manual for the course "Industrial ecology" for students of specialty 6.040106 "Ecology, environmental protection and balanced nature management". Kyiv: NTUU "KPI" [in Ukrainian].
16. Xu, C., & Lancaster, J. (2008). Conversion of secondary pulp/paper sludge powder to liquid oil products for energy recovery by direct liquefaction in hot-compressed water. *Water Research*, 42(6-7), 1571-1582. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.11.007>
17. David, P.K. (1995). Converting paper, paper mill sludge and other industrial wastes into pellet fuel. Tappi Press, USA.
18. Cavka, A., Guo, X., Tang, S.J., Wenstrand, S., Jonsson, L.G., & Feng Hong, F. (2013). Production of bacterial cellulose and enzyme from waste fiber sludge. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 6, 1-10. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-25>
19. Mazepa, Yu.V., Seminskyi, O.O., & Ryabtsev, G.L. (2010). Ecological methods of processing wet sludge from pulp and paper production wastewater. *Chemical engineering, ecology and resource conservation: coll. of science works*, 2(6), 72-75 [in Ukrainian].
20. Ahmad, S., Iqbal Malik, M., Bashir Wani, M., & Ahmad, R. (2013). Study of concrete involving use of waste paper sludge ash as partial replacement of cement. *IOSR Journal of Engineering*, 3(11), 6-15 <http://dx.doi.org/10.9790/3021-031130615>
21. Batalin, B.I., & Kozlov, I. (2004). Building materials based on waste pulp and paper industry. *Building materials: collection of science works*, 1, 42-43 [in Ukrainian].

22. Bat, R. Ya., & Maliovani, M.S. (2006). Technology of creating a biocomposite based on forest and pulp and paper industry waste. *Scientific Bulletin of National Technical University of Ukraine*, 16(2), 86-88 [in Ukrainian].
23. Sobol, K., Solodky, S., Petrovska, N., Belov, S., Hunyak, O., & Hidei, V. (2020). Chemical Composition and Hydraulic Properties of Incinerated Wastepaper Sludge. *Chemistry & Chemical Technology*, 14(4), 538–544. <https://doi.org/10.23939/chcht14.04.538>
24. Romanenko, T.B., & Zinovchuk, N.V. (2021). Prospects of using pulp and paper industry by-products in agriculture. *Balanced nature management*, 3, 96-102 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2021.247144>
25. Hidei, V., Sidun, Iu., Hunyak, O., Stanchak, S., & Bidos, V. (2020). Application of Thermoactivated Wastepaper Sludge Ash as Mineral Powder for Hot Asphalt Concrete Mix. *Journal Theory and Building Practice*, 2(2), 42-47. <https://doi.org/10.23939/jtbp2020.02.042>

*The article was received 10.05.2024 and was accepted after revision 21.08.2024*

### **Петрушка Ігор Михайлович**

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

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

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

### **Мокрий Володимир Іванович**

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-5160> **e-mail:** [volodymyr.i.mokriy@lpnu.ua](mailto:volodymyr.i.mokriy@lpnu.ua)

### **Дмитрів Богдан Андрійович**

аспірант кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»

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

**e-mail:** [bohdan.dmytriv1996@gmail.com](mailto:bohdan.dmytriv1996@gmail.com)

УДК 632.95:628.1[(477-25)]

**Nina Osokina**, Candidate of geol.-min. sciences

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

Institute of Geological Sciences NASU, Kyiv, Ukraine

## **MODERN PROBLEMS OF UKRAINE'S ECOLOGY: AGRICULTURAL POLLUTANTS AND THE QUALITY OF DRINKING WATER IN THE CITY OF KYIV**

**Abstract.** Considered modern problems of Ukraine's ecology. The problem "influence of agriculture on the quality of underground water" is considered in detail. In 1998-2002, 163 analyzes of underground waters of the aquifer of Cenomanian sediments and the aquifer of Jurassic sediments in the city of Kyiv for the content of persistent chlorine-organic pesticides: DDT and its metabolites, hexachlorocyclohexane (HCH) and its isomers, aldrin, heptachlor and the fluor-containing pesticide treflane were carried out by the gas-chromatographic method. In the water of the aquifer of Cenomanian sediments and the aquifer of Jurassic sediments of the city of Kyiv, the average concentration of DDT was at the level of  $10^{-5}$  mg/dm<sup>3</sup>. According to our calculations for the year 2024, the concentration of the amount of DDT in the drinking groundwater of the city of Kyiv has decreased by 2-3 orders of magnitude, depending on natural conditions. This indicates that there no new inputs of DDT to natural ecosystems, and retrospective contamination is gradually decreasing. The need to conduct fundamental research of establishing concentrations of new pesticides in groundwater, developing criteria for assessing the danger of co-presence of pesticides of various classes of chemical compounds in groundwater and other natural objects remains relevant. In 2023-2024, 58 wells were examined for the quality of drinking water in Kyiv.

**Key words:** problems of ecology, agricultural pollutants, the quality of drinking waters.

**Н.П. Осокіна**

Інститут геологічних наук НАН України, м. Київ, Україна

## **СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЇ УКРАЇНИ: СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ ЗАБРУДНЮВАЧІ І ЯКІСТЬ ПИТНОЇ ВОДИ М. КИЄВА**

**Анотація.** Розглянуто сучасні проблеми екології України. Більш детально розглянуто проблему «вплив сільського господарства на якість підземних вод». В 1998-2002 рр. проведені дослідження методом газової хроматографії, 163 аналізи підземних вод водоносного горизонту сеноманських відкладень і водоносного горизонту юрських відкладень м. Києва на вміст стійких хлорорганічних пестицидів (ХОП): ДДТ та його метаболітів, ГХЦГ та його ізомерів, альдрину, гептахлору та фторвміщуючого пестициду (ФП) – трєфлану. У воді водоносного горизонту сеноманських відкладень і водоносного горизонту юрських відкладень середні концентрації ДДТ знаходяться на рівні  $10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>. За нашими розрахунками на 2024 рік концентрація ДДТ у питних підземних водах м. Києва зменшилась на 2-3 порядки, в залежності від природних умов. Це свідчить про те, що нових надходжень ДДТ до природних екосистем не було, а ретроспективне

*забруднення поступово знижується. Актуальною залишається необхідність проведення фундаментальних досліджень щодо встановлення концентрацій нових пестицидів у підземних водах, розроблення критеріїв оцінки небезпеки спільної присутності пестицидів різних класів хімічних сполук у питних водах та інших природних об'єктах. У 2023-2024 рр. досліджено 58 свердловин на якість питної води м. Києва.*

**Ключові слова:** *проблеми екології, сільськогосподарські забруднювачі, якість питної води.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.22-27>

## Вступ

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

Екологічні проблеми України [5]:

- 1) забруднення питної водопровідної води;
- 2) забруднення атмосфери, особливо в промислових регіонах країни;
- 3) знищення земельних ресурсів (деградація чорноземів України);
- 4) знищення зелених насаджень (вирубка лісів);
- 5) забруднення водних ресурсів (акваторії Чорного моря, поверхневі води);
- 6) дефіцит питної води;
- 7) вплив гірничовидобувної промисловості на довкілля [4];
- 8) нафтохімічне забруднення довкілля (підземні води, ґрунти);
- 9) вплив АЕС і підприємств урановидобувної та уранопереробної промисловості на довкілля;
- 10) вплив сільського господарства на якість підземних вод;
- 11) вплив військово-промислового комплексу на природне середовище;
- 12) екоцид внаслідок Російсько-Української війни 2014-2024 років (підрив Каховської ГЕС, знищення заповідних територій, лісів, мінування сільськогосподарських угідь та інше).

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

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



Питна вода в Україні вже скоро може стати дефіцитом. Ми знаходимося на 32-му місці серед 40 за забезпеченістю питною водою в Європі та входимо до списку країн, яким загрожує нестача водних ресурсів. А згідно з результатами дослідження, проведеного у 2019 році на замовлення Світового фінансового банку, за кількістю питної води на душу населення Україна посіла 125-те місце серед 180 країн [5].

В цій роботі розглянемо проблему впливу сільського господарства на якість підземних вод (на прикладі м. Києва) [3]. Наша робота «Вміст залишкових кількостей пестицидів у підземних водах та інших об'єктах природного середовища окремих регіонів України» [3] продовжила напрямом з біогеохімії, розпочатий видатним ученим, мислителем та громадянином В.І. Вернадським.

### Фактичний матеріал та методологія досліджень

У 1998 р. нами методом газової хроматографії були проведені дослідження підземних вод м. Києва на вміст стійких хлорорганічних пестицидів (ХОП): ДДТ та його метаболітів, ГХЦГ та його ізомерів, альдрину, гептахлору та фторвміщуючого пестициду (ФП) – трефлану.

У м. Києві було відібрано 8 проб води водоносного горизонту сеноманських відкладень і 5 проб води водоносного горизонту юрських відкладень. У воді водоносного горизонту сеноманських відкладень (табл. 1) середні концентрації  $\Sigma$ ДДТ знаходяться на рівні  $3.5 \cdot 10^{-5}$ ;  $\Sigma$ ГХЦГ присутня у концентрації  $2.3 \cdot 10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>.

Таблиця 1. Вміст пестицидів у підземних водах водоносного горизонту сеноманських відкладень м. Києва, мг/дм<sup>3</sup>

№ п/п	Місце відбору Район м. Києва	$\Sigma$ ДДТ	$\Sigma$ ГХЦГ	Альдрин	Гептахлор	Трефлан
1	Свердл.212 Оболонь	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$5.8 \cdot 10^{-5}$	Н.о.	Н.о.	Н.о.
2	Свердл.358 Троєщина	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$	Н.о.	Н.о.	Н.о.
3	Свердл.221 Оболонь	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	Н.о.	$6.2 \cdot 10^{-5}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$
4	Свердл.9 Деснянський	$5.4 \cdot 10^{-5}$	$3.4 \cdot 10^{-5}$	Н.о.	$9.2 \cdot 10^{-5}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$
5	Свердл.41 Печерський	$1.05 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	Н.о.	Н.о.	Н.о.
6	Свердл.59 Нивки	Н.о.	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-7}$	Н.о.	Н.о.
7	Свердл.170	$5.7 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	Н.о.
8	Свердл.3 Деснянський	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	Н.о.	Н.о.	Н.о.
9	Середня концентрація	$3.5 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-9}$

У воді водоносного горизонту юрських відкладень (табл. 2) середні концентрації ДДТ знаходяться на рівні  $7.9 \cdot 10^{-5}$ ; ГХЦГ містяться в концентрації  $2.3 \cdot 10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>.

За нашими розрахунками на 2024 рік концентрація ДДТ у питних підземних водах м. Києва зменшилась на 2-3 порядки, в залежності від природних умов. Це свідчить про те, що нових надходжень ДДТ до природних екосистем не було, а ретроспективне забруднення поступово знижується.

Таблиця 2. Вміст пестицидів у підземних водах водоносного горизонту юрських відкладень м. Києва, мг/дм<sup>3</sup>

№ п/п	Місце відбору район м. Києва	ΣДДТ	ΣГХЦГ	Альдрин	Гептахлор	Трефлан
1	Свердл.359 вул. Драйзера	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$5.9 \cdot 10^{-5}$	Н.о.	Н.о.	Н.о.
2	Свердл.72 Площа Перемоги	$3.1 \cdot 10^{-4}$	$8.8 \cdot 10^{-6}$	Н.о.	Н.о.	Н.о.
3	Свердл.193 Оболонь	$6.9 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-5}$	Н.о.	$7.9 \cdot 10^{-5}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$
4	Свердл.10	$9 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-7}$	Н.о.	Н.о.
5	Свердл.349 Троещина	$3.6 \cdot 10^{-7}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$	Н.о.	Н.о.	Н.о.
6	Середня концентрація	$7.9 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-9}$

Результати розширеного дослідження 150 свердловин якості артезіанської питної води в системі бюветного водопостачання м. Києва [1], проведеного в 1999-2002 рр., показали, що вода з глибини 90-193 м водоносного горизонту сеноманських відкладень (93 бювети), вода з глибини 256-337 м водоносного горизонту юрських відкладень (26 бюветів), вода змішана – водоносних горизонтів сеноманських та юрських відкладень (31 бювет), вода питна водопровідна м. Києва містять  $\gamma$ -ГХЦГ на рівні  $10^{-8}$  мг/дм<sup>3</sup>, гептахлор на рівні  $10^{-6}$  мг/дм<sup>3</sup>, альдрин –  $10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>, ДДТ, ДДЕ, ДДД на рівні  $10^{-5}$  мг/дм<sup>3</sup>, що нижче ГДК (СанПіН 2.1.4.559-96) по ΣДДТ на 2 порядки; ГХЦГ на 5 порядків нижче ГДК; гептахлор на 4 порядки нижче ГДК; альдрин на 2 порядки нижче ГДК.

Середні значення показників якості проб підземних вод, відібраних у 2023-2024 роках в м. Києві, наведені в табл. 3 [2].

Таблиця 3. Середні значення показників якості проб підземних вод, відібраних у 2023-2024 роках в м. Києві (58 свердловин)

Нормативне значення показника згідно з ДСан ПІН 2.2.4-171-10		м. Київ
Запах, бали	≤ 2	0.00
Мутність, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 0.58	<b>0.9</b>
Кольоровість, град	≤ 20	10
Твердість загальна мг-екв/дм <sup>3</sup>	≤ 7	<b>8.7</b>
Сухий залишок, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 1000	575
Залізо загальне, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 0.2	0.1
Нітрати, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 50	18
Хлориди, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 250	53
Марганець мг/дм <sup>3</sup>	≤ 0.05	0.01
Перманганатна окислюваність, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 5	1.3
Фториди, мг/дм <sup>3</sup>	≤ 1.5	1.3

Показники мутності і твердості загальної перевищують нормативне значення показника згідно з ДСанПІН 2.2.4-171-10.

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

## **Висновки**

Зниження рівня забруднення підземних вод хлорорганічними пестицидами, що спостерігається, жодною мірою не зменшує актуальності завдання проведення систематичних спостережень за вмістом пестицидів у підземних водах господарсько-питного та культурно-побутового водокористування. Повинна діяти налагоджена система проведення екологічної експертизи територій з метою усунення або зменшення негативного впливу пестицидів, асортименти та норми витрати яких можуть змінюватися. Актуальною залишається необхідність проведення фундаментальних досліджень щодо встановлення концентрацій нових пестицидів у підземних водах, розроблення критеріїв оцінки небезпеки спільної присутності пестицидів різних класів хімічних сполук у питних водах та інших природних об'єктах.

В контексті триваючої війни, моніторинг якості води набуває особливої важливості [2]. Війна може призвести до забруднення водних ресурсів через бойові дії, руйнування інфраструктури та можливі викиди в навколишнє середовище хімічних речовин. Це ставить під загрозу доступ до чистої питної води для мільйонів людей.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Бювети Києва. Якість артезіанської води. За ред. В.В. Гончарука – К.: Геопринт, 2003. – 110 с.
2. Дрікер Ю. «Підземні води України: важливий ресурс в умовах війни». Ж. «Вода і водоочисні технології, №1-2 (107-108), 2024, стор. 60-63.
3. Осокина Н.П. Содержание остаточных количеств пестицидов в подземных водах и других объектах природной среды отдельных регионов Украины – К.: Издатель Кравченко Я.О., 2019. – 190 с.
4. Рудько Г.І., Депутат Б.Ю. Екологічна безпека навколишнього середовища України. Контури проблеми / Екологія довкілля та безпека життєдіяльності / ІВЦТ «Знання» України № 4 – К.: 2003. – С. 22-29.
5. [nv.ua/opinion/ukraina\\_ekologiya-kakovy-samy-bolshie-ecologicheskie-problemy-strany-novosti-ukrainy-59178582.htm](http://nv.ua/opinion/ukraina_ekologiya-kakovy-samy-bolshie-ecologicheskie-problemy-strany-novosti-ukrainy-59178582.htm)

*Стаття надійшла до редакції 22.04.2024 і прийнята до друку після рецензування 24.07.2024*

## **REFERENCES**

1. Honcharuk, V.V. (Ed.). (2003). Buvety of Kyiv. Artesian water quality. Kyiv: Geoprint [in Ukrainian].
2. Driker, Yu. (2024). Underground waters of Ukraine: an important resource in the conditions of war. *J. "Water and water treatment technologies"*, 1-2 (107-108), 60-63 [in Ukrainian].

3. Osokina, N.P. (2019). The content of the final amounts of pesticides in groundwater and other objects of the natural environment of some regions of Ukraine. Kyiv: Publisher Ya.O. Kravchenko [in Russian].
4. Rudko, G.I., & Deputat, B.Yu. (2003). Ecological safety of the environment of Ukraine. Contours of the problem. *Ecology of the environment and safety of life activities*, 4, 22-29 [in Ukrainian].
5. Retrieved from [nv.ua/opinion/ukraina\\_ekologiya-kakovy-samye-bolshie-ecologicheskije-problemy-strany-novosti-ukrainy-59178582.htm](http://nv.ua/opinion/ukraina_ekologiya-kakovy-samye-bolshie-ecologicheskije-problemy-strany-novosti-ukrainy-59178582.htm)

*The article was received 22.04.2024 and was accepted after revision 24.07.2024*

**Осокіна Ніна Павлівна**

кандидат геолого-мінералогічних наук, Інститут геологічних наук НАН України

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

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

UOT: 628.31.631.85

**Nigar Zeydulla Mehdiyeva**, Doctor of Philosophy

*e-mail*: niqus598@gmail.com

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

## **FERTILITY INDICATORS OF SOILS IN THE SIYAZAN-SUMGAYIT MASSIVE**

**Abstract.** *Recently, the reforms in the direction of increasing manufacture of the agricultural products, ensuring food safety have given their positive results. There are some opportunities to produce material goods, to ensure economical development, to raise people's standard of living in the country. As it is known, Azerbaijan possesses natural underground and surface resources. But the soil and water supplies are quite limited. Lately, some difficulties have been created in provision of agricultural plants with irrigated water.*

*It should be noted that, one of the factors negatively affecting the agriculture is soil salinization and solonetzification. The soil salinization led not only to decrease of the productivity and qualitative indicators but also to disturbance of the ecological balance, to long-term loss of fertility and other insufficiencies. Today elimination of the same difficulties is considered one of the most important problems.*

*From this point of view, the researchers conducted in the deluvial salinized soils are important and definition of the fertility indicators in the same soils is considered one of the most important issues.*

**Keywords:** *massiv, fertility, humus, salinization, solonetzification.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.28-32>

### **1. Introduction**

The experimental areas have been selected as a research object in the Gilazi and Shurabad villages of the Khizi district located in the Siyazan-Sumgayit massive. The soil sections have been applied in the same areas, the samples have been taken, the required chemical analyses have been realized according to the wide-spread method [10].

### **2. Analysis and Discussion**

With the Decree of the President of the Republic of Azerbaijan dated December 6, 2016 the issues arising from the "Strategic Road Map" are being resolved. Realization of nine strategic marks is noticed in order to create a good environment in terms of achievement of formation of the production and processing sector of the agricultural crops by grounding on stable development principles at the expense of realization of the Strategic Road Map in the country in 2016-2020 years. These strategic marks include intensification of food safety stability, increase of manufacture potential of the agricultural crops, development relevant resources, including financing, increasing the scientific certainty in agriculture and educational quality, development of the advice-information services system, development of the market structure and facilitating market access for producers, formation of mechanisms for sustainable resource use, improvement of the business environment

on agrarian area and welfare promotion issues in the villages [3]. At present, adoption of the law “On Soil Fertility” approved by the President of the Republic of Azerbaijan, Mr. Ilham Aliyev, and the State Program (2008) on the Provision of Food Products to the population in the Azerbaijan Republic in 2008-2015 regulates soil fertility indicators and requires the elimination of soil-ecological changes.

As it is known, the irrigated soils are intensively used in agriculture of our republic. These soils strongly differ for their some indicators, including physical structure and chemical compositions. The same difference shows itself in granulometric composition, salinization, solonetzification, swamping, an amount of the nutrients, eroding rate and other signs of the soils. Changes have occurred in morphological signs of the irrigated soils while they are exploited for a long time [2, 13]. Fertile soil layer is formed as a result of the mixing of various plant and animal remains and debris. Therefore, there is a great importance in correct use of soil and its protection. So, deforestation, incorrect use of the meadows caused soil weathering, i.e. washing out of its fertile layer by the water and wind [7].

The comparative analyses of the local and foreign scientists' researches show that it is impossible to use amelioration for preservation and restoration of soil fertility in the using agricultural areas. Senchukov H.A. and others show that of individually and complexly and timely application, degradation processes occurring in soil helps restoration and increase of soil fertility. Use of the different sorts of amelioration improves agro-physical, water-physical and chemical features of soils, rises humus quantity, stimulates collecting of the organic substances in soil and increases biometric indicators of the growing crops and this causes increase of the plant productivity [14]. The carried out investigations show that the present state of fertility of some soils isn't satisfactory in agricultural usage. Deterioration of the fertility indicators is due to the human's direct influence on soil, changes in the environment and global ecological problems. According to V.R. Williams fertility is a main and from the mountain rocks from which it is formed [11]. According to the author all the life factors of the plant is closely related to each other and equally important. It is known that one of the factors affecting the soil fertility is a quantity and composition of absorbed bases. K.K. Hedroyts has great services in formation of how that soil and experimentally determined an absorbing ability of soils [12]. It is possible to regulate the composition of absorbed cations in soils under sowing by the chemical means which serve fertility increase. There is great importance of composition of the exchangeable bases for soil fertility. Firstly, alkalinity and acidity of soils are determined by them. The soil characters change depending on quantity of  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$  and  $\text{H}^{+}$  absorbed cations in absorbing complex or ratio of soil. These cations coagulate soil colloids, restore its structure and creates water-resistant in soil aggregates. The soil possesses inconvenient feature while  $\text{H}^{+}$  ions are in absorbing complex of soil. The best condition for plant nourishment is created when the cations necessary for plant nourishment and  $\text{Ca}^{+2}$  prevail in absorbing complex of soil.  $\text{Na}^{+}$  ion peptifies colloids in absorbed form and negatively affects the physical and water-physical features of soil [6]. Study of the absorbed bases in soils is one of the main issues in determination of solonetzification process in them. The carried out scientific researches show that the sum of absorbed or exchangeable cations that can be removed from the soil is a characteristic quantity that determines its absorption capacity. It can be changed at that time when the zone is irrigated for a long time, fertilizer is applied and large agro-technical measures are fulfilled [8]. From this point of view the issues listed in the conducted researches in the Siyazan-

Sumgayit massive have been clarified. Some scientists conducted large and comprehensive researches in the massive in different years (M.A. Abduev, A.K. Alimov, E.M. Eyvazov, M.I. Iskandarov, I.A. Akbarov, N.R. Suleymanov, I.N. Shirinov, etc). M.R. Abduev conducted a large-scaled researches in the massive in 1968, the author studied physical, physical-chemical characters of the soils exposed to deluvial salinization and gave his suggestions. It was determined that grey-cinnamonic soils (Calcic Cypsisols) spread in a wide zone in the massive. The meadow-desert – grey-cinnamonic soils are available in the zones where grey-cinnamonic (Calcic Cypsisols) soils spread and they develop under grainy-wormwood plants in the depression areas. The grey-cinnamonic (Calcic Cypsisols) soils belong to chloride-sulfate type. Weak structure is characteristic for these soils and the humidity supply isn't great. Higher alkalinity is observed in grey-cinnamonic soils of the massive (0.08-0.13%).

As it is known, a role of the humus composition is very great in formation of soil fertility, in growing and development of the plant. The humus substance provides continuity of nutrients assimilation by the plant. Humus possesses absorbing ability and creates soil buffering together with the colloid particles. Nitrogen, phosphorus, sulfur, calcium, etc., which are main nutrients gather in humus composition. Its majority in soil is stipulation of the higher production. A main point is that, as the amount of humus decreases in soil, its participation in formation of the product becomes more effective [7]. The amount of humus was also studied in the experimental area and it was determined that its quantity on the upper layers was 1.79-1.82%.

Table 1. Composition of absorbed bases in the soils of the experimental area

Section №	Depth, cm	Mg.eq			Total Mg.eq	In % of total			Humus	pH	CaCO <sub>3</sub> , %
		Ca	Mg	Na		Ca	Mg	Na			
N-1	0-23	10,12	1,75	8,75	20,62	49,08	8,48	42,44	1,79	7,87	7,95
	23-61	8,42	3,43	13,52	25,37	33,18	13,52	53,30	1,13	8,15	8,43
	61-112	6,87	5,97	11,92	24,76	27,75	24,11	48,14	0,82	8,23	8,75
	112-178	10,89	3,02	2,35	16,26	66,97	18,57	14,46	0,51	8,14	9,25
N-2	0-35	15,54	2,32	7,89	25,75	60,35	9,010	30,64	1,82	7,86	8,35
	35-68	9,35	3,67	12,13	25,15	37,17	14,60	48,23	1,16	8,18	8,58
	68-91	7,05	6,12	11,54	24,71	28,53	24,76	46,71	0,89	8,13	8,72
	91-182	9,76	2,97	2,67	15,40	63,37	19,29	17,34	0,48	8,10	9,05

Absorbed bases, a quantity of pH, humus and CaCO<sub>3</sub> have been determined in 2 sections in the research area and the obtained results have been shown on the table. As it is seen from the table, a quantity of Ca is dominant in a sum of absorbed bases and its amount is 28.53-66.97%. A quantity of Mg is 7.29-24.76% and Na is 14.46-53.30%. pH is 7.86-8.23. Accordingly, an amount of humus is 0.48-1.79% and CaCO<sub>3</sub> vibrates by 7.95-9.25%.

Generally, establishment of profitable irrigation networks, application of the progressive irrigation methods are important among the agro-ameliorative measures which have been conducted in the direction of increase of soil fertility and production of the growing agricultural plants [4, 9].

### 3. Conclusion

1. As a result of the researches it was determined that SAB was 20.62-25.75 mg.eq on the upper layer in the soils of the experimental area. Ca prevails in SAB and its quantity is 27.75-66.97%. Na is 17.36-53.30% and they are solonchak. This is characteristic for the same soils.

2. A quantity of humus in the same soils is 1.79-1.82%. According to the results the same soils are poorly provided with humus.

3. pH is 7.86-8.23% and these soils possess alkaline environment. An amount of  $\text{CaCO}_3$  is 7.95-9.25%.

4. The researches show that application of the irrigation methods for increase of soil fertility and production of the agricultural plants and ensuring the use of complex agro-ameliorative measures are suggested.

### Acknowledgments

I express my gratitude to the scientists whose materials I used for comparative analysis in this area on the topic of the article.

### REFERENCES

1. Abduev, M.R. (2012). Salinized soils of deluvial form and issues of their amelioration. 30-39.
2. Arinushkina, E.B. (1970). Guide on the chemical analysis of soils. 483.
3. Aslanov, H.G. (2004). Soils amelioration. 352.
4. Azizov, G.Z. (2006). Water-salt balance of the ameliorating soil-ground in the Kur-Araz valley and analysis of its results. 326.
5. Gedroitz, K.K. (1955). Selected essays.
6. Iskenderov, M.Y. (2018). Amelioration of salinized soils and the environment, 3.
7. Mammadov, G.Sh. (2007). Bases of soil science and soil geography. 590-592.
8. Mammadova, S.Z., & Jafarov, A.B. (2005). Fertility character of soil. 45.
9. Mustafayev, M.G. (2019). Modern state of soils in the Mughan-Salyan massive and scientific bases of their improvement. 53.
10. Mustafayev, M.G. (2020). Change of the salts quantity and type in the irrigated soils of the Mughan plain and their impact on plants productivity. *International Journal Food Science and Agriculture*, 101-108.
11. Mehdiyeva, H.Z. (2022). Salt types of soils in the territory of Siyazan-Sumgayit. *Amelioration Scientific Journal*, 3(101), 19-23.
12. Senchukov, G.A., & Ponomarenko, T.S. (2022). Effect of various types and sorts of amelioration on restoration and increase of degraded soils fertility. *Journal of amelioration and hydro-technics*, 12(1), 141-156.
13. Williams, B.P. (1949). Soil science, pub. Soch. in 2 volumes, v. II.
14. Retrieved from <https://mstasc.nakhchivan.az/index.php/s-kill-r/xeberlerAmelioration>
15. Retrieved from <https://xazar-ih.gov.az/storage/files/38542.pdf>. s. 119

*The article was received 29.03.2024 and was accepted after revision 03.07.2024*



### **Н.З. Мехдієва** **ПОКАЗНИКИ РОДЮЧОСТІ ҐРУНТІВ СІЯАНСЬКО-СУМГАЇТСЬКОГО** **МАСИВУ**

**Анотація.** Останнім часом реформи у напрямку збільшення виробництва сільськогосподарської продукції, забезпечення харчової безпеки дали свої позитивні результати. Є певні можливості для виробництва матеріальних благ, для забезпечення економічного розвитку, підвищення рівня життя людей в країні. Як відомо, Азербайджан володіє природними підземними і наземними ресурсами. Але запаси ґрунту та води досить обмежені. Останнім часом виникли певні труднощі із забезпеченням сільськогосподарських рослин поливною водою.

Слід зазначити, що одним із факторів негативного впливу на сільське господарство є засолення та солонцювання ґрунтів. Засолення ґрунтів призводить не тільки до зниження продуктивності та якісних показників, а й до порушення екологічної рівноваги, тривалої втрати родючості та інших негативних ефектів. На сьогодні усунення цих труднощів вважається однією з найважливіших проблем.

З цієї точки зору, дослідження, проведені в делювіальних засолених ґрунтах, є вкрай важливими, а визначення показників родючості в цих ґрунтах вважається одним із ключових питань.

**Ключові слова:** масив, родючість, гумус, засолення, солонцювання.

*Стаття надійшла до редакції 29.03.2024 і прийнята до друку після рецензування 03.07.2024*

#### **Мехдієва Ніґяр Зейдулла**

доктор філософії, Інститут ґрунтознавства та агрохімії Міністерства науки і освіти Азербайджанської Республіки

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

**e-mail:** niqus598@gmail.com

UDK 502.51:504.5

**Volodymyr Maikovych**, Post-Graduate of Department of Ecology

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-6373-270X>

*e-mail*: volodymyr.maikovych@nung.edu.ua

**Yaroslav Adamenko**, Doctor of Technical Science, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5665-7958>

*e-mail*: yaroslav.adamenko@nung.edu.ua

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

## **ASSESSMENT OF THE IMPACT OF CONSTRUCTION WASTE GENERATION ON THE ENVIRONMENT**

**Abstract.** *The purpose of the work is to analyse the impact on the environment of construction waste based on the analysis of literary sources with the determination of the priority of the flow, as well as the standard of environmental assessment with the establishment of the probability of impact and to determine management strategies to mitigate environmental risks.*

*A detailed review of the world literature on the environmental impact of construction waste was conducted. Seventeen relevant environmental impact factors of construction waste were determined based on the analysis of scientific articles. The predominant factor for our country in wartime is the generation of waste in the process of destruction from explosions and, as a result, environmental pollution in the process of creating construction waste, including hazardous chemicals. Priority factors also included: risks to public health and safety, dust pollution of the atmosphere, etc.*

*The analysis of regulatory documents and obligations aimed at improving the state of the environment at the state and international levels, which must be taken into account in the process of construction, waste generation and handling, has been carried out.*

*Taking into account the "Methodical recommendations for the implementation of a strategic environmental assessment...", for the first time we carried out a description of the consequences for the environment of the generation of construction waste in the process of construction or destruction of structures, including for the health of the population – any possible consequences for flora and fauna, biodiversity, soil, climate, air, water, landscape (including man-made), natural territories and objects, safety of the population and its health, material assets, objects of cultural heritage and the interaction of these factors.*

*The research was focused on the ecological assessment of the impact of construction waste on the environment and the search for the best strategies for handling this type of waste for the conditions of Ukraine using construction waste as an example. Mitigating the negative environmental impacts of construction waste on the environment is possible through the implementation of global practices for handling such waste. Fifteen recommendations are proposed based on a review of literature sources.*

**Keywords:** *environmental assessment, environmental impact, construction waste.*

**В.Є. Майкович, Я.О. Адаменко**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
м. Івано-Франківськ, Україна

## **ОЦІНКА ВПЛИВУ УТВОРЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ ВІДХОДІВ НА ДОВКІЛЛЯ**

***Анотація.** Мета роботи – проаналізувати вплив на довкілля будівельних відходів за аналізом літературних джерел із визначенням пріоритетності впливу, також за стандартом екологічної оцінки із встановленням ймовірності впливу та визначити стратегії управління для пом'якшення екологічних ризиків.*

*Було проведено детальний огляд світової літератури із впливу на довкілля будівельних відходів. Базуючись на аналізі наукових статей, було визначено сімнадцять релевантних факторів впливу на довкілля будівельних відходів. Переважаючим чинником для нашої країни у військовий час є утворення відходів в процесі руйнування від вибухів і, як наслідок, – забруднення навколишнього середовища в процесі утворення будівельних відходів, в тому числі небезпечними хімічними речовинами. До пріоритетних факторів також увійшли: ризики для громадського здоров'я та безпеки, пилове забруднення атмосфери тощо.*

*Виконаний аналіз нормативних документів і зобов'язань, спрямованих на покращення стану довкілля на державному та міжнародному рівнях, які необхідно враховувати в процесі будівництва, утворення відходів і поводження з ними.*

*Із врахуванням «Методичних рекомендацій із здійснення стратегічної екологічної оцінки...» вперше нами було проведено опис наслідків для довкілля утворення будівельних відходів в процесі будівництва або руйнування споруд, у тому числі для здоров'я населення – будь-які ймовірні наслідки для флори, фауни, біорізноманіття, ґрунту, клімату, повітря, води, ландшафту (включаючи техногенного), природних територій та об'єктів, безпеки життєдіяльності населення та його здоров'я, матеріальних активів, об'єктів культурної спадщини та взаємодія цих факторів.*

*Дослідження було зосереджено на екологічній оцінці впливу на довкілля будівельних відходів та пошуку найкращих стратегій поводження з таким типом відходів для умов України на прикладі відходів будівництва. Пом'якшення негативних екологічних впливів будівельних відходів на довкілля можливе шляхом впровадження світових практик поводження з такими відходами. Запропоновано п'ятнадцять рекомендацій на основі огляду літературних джерел.*

***Ключові слова:** екологічна оцінка, вплив на довкілля, будівельні відходи.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.33-46>

### **Вступ**

Будівельний сектор відіграє життєво важливу роль у задоволенні потреб суспільства, а також покращенні якості життя [1]. В Україні щорічні інвестиції в будівельну діяльність складають десятки мільярдів доларів і у період післявоєнного відновлення очікуються суттєві темпи зростання [2]. За попередніми оцінками для відновлення зруйнованої інфраструктури в наступні 10 років необхідно близько 400 мільярдів доларів.

Економічний розвиток України навіть у воєнний час суттєво залежить від будівельних проєктів [3]. Будівельна галузь у м. Івано-Франківськ, зокрема, пропонує значну кількість робочих місць, у вигляді податків підтримує бюджет територіальної громади та служить основою для інших видів бізнесу [4]. Роль, яку будівельна галузь відіграє в соціально-економічному розвитку України у воєнний час, включає проєкти не тільки цивільного, а й важкого машинобудування, будівництва фортифікаційних споруд, які відповідають за майбутнє існування країни на карті Європи [5].

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

У країнах, що розвиваються, будівельна діяльність становить 80% загальних капітальних активів, 10% їх ВВП [6].

З екологічної точки зору будівельна галузь споживає значний обсяг природних ресурсів і утворює більшу частину твердих побутових відходів [7, 8]. Порівняно з іншими видами відходів будівельне сміття має великий об'єм [9, 10]. Проведені дослідження світового рівня стверджують, що будівельні відходи складають третину всіх відходів [11]. Згідно з дослідженням [12], будівельне сміття становить приблизно 10–30% відходів, які захоронені на звалищах по всьому світу. Оцінено кількість спожитих природних ресурсів і відходів, які утворюються на будівельних майданчиках [13]. Доведено, що будівельні роботи та будівництво споживають 60% природних мінеральних ресурсів, 40% цього обсягу становлять проєкти будівництва. Будівельна галузь виробляє приблизно 35% від загального обсягу відходів, які потрапляють у навколишнє середовище в усьому світі [14, 15]. У порівнянні – світова промисловість використовує 35% всієї енергії та продукує 40% вуглекислого газу антропогенного походження, який потрапляє в атмосферу [9]. На світовому рівні будівельна галузь відповідає за 40% від загального обсягу споживання енергії та природних ресурсів [16].

### **Мета роботи**

Це дослідження має на меті проаналізувати вплив на довкілля будівельних відходів за аналізом літературних джерел із визначенням пріоритетності впливу, також за стандартом екологічної оцінки із встановленням ймовірності впливу та визначити стратегії управління для пом'якшення екологічних ризиків.

### **Методи дослідження**

Дослідження було зосереджено на екологічній оцінці впливу на довкілля будівельних відходів та пошуку найкращих стратегій поводження з таким типом відходів для умов України, на прикладі відходів цивільного будівництва. Було проведено детальний огляд світової літератури із впливу на довкілля будівельних відходів, аналіз нормативних документів, законодавчих актів державних і міжнародних, які регулюють вплив на довкілля. Із застосуванням «Методичних рекомендацій із здійснення стратегічної екологічної оцінки...» вперше нами було проведено опис наслідків для довкілля утворення будівельних відходів в процесі будівництва або руйнування споруд.

## Виклад основного матеріалу

Базуючись на аналізі наукових статей, було визначено сімнадцять релевантних факторів впливу на довкілля будівельних відходів (табл. 1). Переважаючим чинником для нашої країни у військовий час є утворення відходів під час руйнування від вибухів і, як наслідок, – забруднення навколишнього середовища в процесі утворення будівельних відходів, в тому числі небезпечними хімічними речовинами.

Наступним кроком дослідження став аналіз нормативних документів, законодавчих актів державних і міжнародних, які регулюють вплив на довкілля в Україні, а отже, які необхідно враховувати в процесі будівництва і утворення відходів (табл. 2).

Таблиця 1. Переважаючі фактори впливу на довкілля процесу будівництва і утворення відходів за літературним оглядом

Ранг	Фактор впливу	Літературне джерело
1	2	3
1	Забруднення навколишнього середовища в процесі утворення будівельних відходів (в т.ч. небезпечних хімічних речовин)	Hossain, and Ng (2019) [17] Luangcharoenrat et al. (2019) [9]
2	Надмірне споживання природних мінеральних ресурсів і виснаження родовищ будівельних матеріалів	Asif et al. (2007) [16] Ignacio et al. (2011) [18]
3	Ризики для громадського здоров'я та безпеки	Nguimalet (2007) [19] Tafesse (2021) [10]
4	Забруднення ґрунту будівельними відходами (в т.ч. хімікатами)	Luangcharoenrat et al. (2019) [9] Aboginije et al. (2020) [20]
5	Пилове забруднення атмосферного повітря	Nguimalet (2007) [19]
6	Утворення відходів, які спричиняють забруднення води	Olusanjo et al. (2014) [21] Aboginije et al. (2020) [20]
7	Використання земельних площ для складування відходів	Yeheyis та ін. (2013) [22] Polat et al. (2017) [12]
8	Вплив на біорізноманіття та руйнування життєвого середовища біоти процесу будівництва і утворення відходів	ELARD і GAA (2009) [23] Фісуненко та ін. (2022) [3]
9	Викиди парникових газів в атмосферу та внесок будівельної індустрії у зміну клімату	Baek et al. (2013) [24] Ajayi et al. (2015) [25]
10	Збільшення впливу на довкілля внаслідок затримки реалізації проєкту або перевищення часу процесу будівництва	Memon et al. (2020) [26] Tafesse, Adugna (2021) [10]
11	Захворювання, пов'язані з високим рівнем забруднення повітря в процесі будівництва і утворення відходів	Nguimalet (2007) [19]
12	Збільшення нелегальних звалищ	Tafesse, Adugna, (2021) [10]

1	2	3
13	Зменшення стійкості сектору будівництва	Ghaleb et al. (2021) [27] ELARD i GAA (2009) [23]
14	Наслідки для добробуту громад внаслідок збільшення відходів, що вивозяться, утилізуються, складаються	Eze et al. (2016), [28] Aslam et al. (2020) [29]
15	Затоплення через засмічення будівельними відходами поверхневих водних об'єктів	Nguimalet (2007) [19] ELARD i GAA (2009) [23]
16	Зниження продуктивності сільського господарства	Josimovic et al. (2014) [30] Olusanjo et al. (2014) [21]
17	Розбіжності між зацікавленими сторонами, конфлікти з громадою	Шибаета та ін. (2023) [1] Нонік та ін. (2023) [2]

Таблиця 2. Зобов'язання, спрямовані на покращення стану довкілля на державному та міжнародному рівнях

Нормативні акти на державному рівні	Нормативні акти на міжнародному рівні
1	2
<i>У сфері державного управління, що стосується охорони довкілля та сталого розвитку</i>	
ЗУ «Про Стратегічну екологічну оцінку»	Протокол про стратегічну екологічну оцінку (Протокол про CEO) до Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище у транскордонному контексті (Конвенція Еспо), ратифікований Верховною Радою України
ЗУ «Про Оцінку впливу на довкілля»	Директива 2001/42/ЄС про оцінку впливу окремих планів і програм на навколишнє середовище, імплементація якої передбачена Угодою про асоціацію між Україною та ЄС
ЗУ «Про основні засади (Стратегію) державної екологічної політики на період до 2030 року	Стратегія ЄС для Дунайського регіону
Указ Президента України «Про розвиток регіону українських Карпат» від 22 липня 2019 року №543/2019	Рамкова конвенція про охорону та сталий розвиток Карпат (Карпатська Конвенція)
<i>У сфері охорони природи, ландшафтного та біорізноманіття</i>	
ЗУ «Про охорону навколишнього природного середовища»	Конвенція про дикі види флори та фауни і середовища існування у Європі (Бернська конвенція)
ЗУ «Про природно-заповідний фонд України»	Конвенція про збереження мігруючих видів диких тварин (Боннська конвенція)
ЗУ «Про екологічну мережу України»	Конвенція про охорону біологічного різноманіття
ЗУ «Про Червону книгу України»	Конвенція про водно-болотні угіддя, що мають міжнародне значення, головним чином як середовище існування водоплавних птахів (Рамсарська конвенція)

Продовження табл. 2

1	2
ЗУ «Про Зелену книгу України»	Конвенція про міжнародну торгівлю видами дикої фауни і флори, що перебувають під загрозою зникнення (CITES)
ЗУ «Про рослинний світ»	Міжнародна Угода про збереження афроєвразійських мігруючих водно-болотних птахів (AEWA)
ЗУ «Про тваринний світ»	Міжнародна Угода про збереження популяцій європейських кажанів (EUROBATS)
ЗУ «Про охорону земель»	Європейська ландшафтна конвенція
ЗУ «Про атмосферне повітря»	Конвенція про транскордонне забруднення повітря на великі відстані
Водний кодекс України	Конвенція щодо співробітництва по охороні та сталому використанню ріки Дунай (Конвенція про охорону ріки Дунай)
Лісовий кодекс України	Конвенція СЕК ООН з охорони та використання транскордонних водотоків
Земельний кодекс України	
Кодекс України про надра	
ЗУ «Про мораторій на проведення суцільних рубок на гірських схилах в ялицево-букових лісах Карпатського регіону»	
ЗУ «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо охорони пралісів згідно з Рамковою конвенцією про охорону та сталий розвиток Карпат»	
Правила рубок головного користування у гірських лісах Карпат	
Санітарні правила в лісах України	
<i>У сфері управління відходами</i>	
ЗУ «Про відходи»	Базельська конвенція про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням
Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року	
Національний план управління відходами до 2030 року	
<i>У сфері містобудування</i>	
ЗУ «Про Генеральну схему планування території України»	
ЗУ «Про регулювання містобудівної діяльності»	
<i>У сфері охорони здоров'я</i>	
ЗУ «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення»	Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішення та доступ до правосуддя з питань, які стосуються довкілля (Оргуська конвенція)
ЗУ «Основи законодавства України про охорону здоров'я»	

Згідно з «Методичними рекомендаціями із здійснення стратегічної екологічної оцінки...», затвердженими Наказом Міністерства екології та природних ресурсів України від 10.08.2018 № 296, нами вперше було проведено опис наслідків для довкілля утворення будівельних відходів в процесі будівництва або руйнування споруд, у тому числі для здоров'я населення – будь-які ймовірні наслідки для флори, фауни, біорізноманіття, ґрунту, клімату, повітря, води, ландшафту (включаючи техногенного), природних територій та об'єктів, безпеки життєдіяльності населення та його здоров'я, матеріальних активів, об'єктів культурної спадщини та взаємодія цих факторів (табл. 3).

Таблиця 3. Оцінка ймовірного впливу утворення будівельних відходів на довкілля відповідно до контрольного переліку

Чи може утворення будівельних відходів спричинити		Негативний вплив			Пом'якшення існуючої ситуації
		так	ймовірно	ні	
1		2	3	4	5
<b>Повітря</b>					
1.	Збільшення викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел			●	-
2.	Збільшення викидів забруднюючих речовин від пересувних джерел	●			+
3.	Погіршення якості атмосферного повітря		●		+
4.	Появу джерел неприємних запахів		●		+
5.	Зміни повітряних потоків, вологості, температури або будь-які локальні чи регіональні зміни клімату			●	-
<b>Водні ресурси</b>					
6.	Збільшення обсягів скидів у поверхневі води		●		+
7.	Будь-які зміни якості поверхневих вод (зокрема таких показників, як температура, розчинений кисень, прозорість, але не обмежуючись ними)		●		+
8.	Збільшення кількості вод, що використовуються для водопостачання населенню			●	-
9.	Значне зменшення кількості вод, що використовуються для водопостачання населенню			●	-
10.	Збільшення навантаження на каналізаційні системи та погіршення якості очистки стічних вод		●		+
11.	Появу загроз для людей і матеріальних об'єктів, пов'язаних з водою (зокрема таких, як паводки або підтоплення)		●		+
12.	Зміни напрямів і швидкості течії поверхневих вод або зміни обсягів води будь-якого поверхневого водного об'єкта			●	-
13.	Порушення гідрологічного та гідрохімічного режиму малих річок регіону		●		+
14.	Зміни напряму або швидкості потоків підземних вод			●	-



Продовження табл. 3

	1	2	3	4	5
15.	Зміни обсягів підземних вод (шляхом відбору чи скидів або ж шляхом порушення водоносних горизонтів)			•	-
16.	Забруднення підземних водоносних горизонтів		•		+
<b>Відходи</b>					
17.	Збільшення кількості утворюваних твердих побутових відходів	•			+
18.	Збільшення кількості утворюваних чи накопичених будівельних відходів IV класу небезпеки	•			+
19.	Збільшення кількості відходів I-III класу небезпеки		•		+
20.	Спорудження еколого-небезпечних об'єктів поводження з відходами		•		+
21.	Утворення або накопичення радіоактивних відходів		•		+
<b>Земельні ресурси</b>					
22.	Порушення, переміщення, ущільнення ґрунтового шару	•			+
23.	Будь-яке посилення вітрової або водної ерозії ґрунтів			•	-
24.	Зміни в топографії або в характеристиках рельєфу		•		+
25.	Появу таких загроз, як землетруси, зсуви, селеві потоки, провали землі та інші подібні загрози через нестабільність літогенної основи або зміни геологічної структури			•	-
26.	Суттєві зміни в структурі земельного фонду, чинній або планованій практиці використання земель	•			+
27.	Виникнення конфліктів між ухваленими цілями стратегії та цілями місцевих громад		•		+
<b>Біорізноманіття та рекреаційні зони</b>					
28.	Негативний вплив на об'єкти природно-заповідного фонду (зменшення площ, початок небезпечної діяльності у безпосередній близькості або на їх території тощо)		•		+
29.	Зміни у кількості видів рослин або тварин, їхній чисельності або територіальному представництві		•		+
30.	Збільшення площ зернових культур або сільськогосподарських угідь в цілому			•	-
31.	Порушення або деградацію середовищ існування диких видів тварин	•			+
32.	Будь-який вплив на кількість і якість наявних рекреаційних можливостей		•		+
33.	Будь-який вплив на наявні об'єкти історико-культурної спадщини		•		+
34.	Інші негативні впливи на естетичні показники об'єктів довкілля (перепони для публічного огляду мальовничих краєвидів, появу естетично неприйнятних місць, руйнування пам'ятників природи тощо)		•		+
<b>Населення та інфраструктура</b>					
35.	Зміни в локалізації, розміщенні, щільності та зростанні кількості населення будь-якої території		•		+
36.	Вплив на нинішній стан забезпечення житлом або виникнення нових потреб у житлі		•		+

Продовження табл. 3

	1	2	3	4	5
37.	Суттєвий вплив на нинішню транспортну систему. Зміни в структурі транспортних потоків		●		+
38.	Необхідність будівництва нових об'єктів для забезпечення транспортних сполучень		●		+
39.	Потреби в нових або суттєвий вплив на наявні комунальні послуги		●		+
40.	Появу будь-яких реальних або потенційних загроз для здоров'я людей		●		+
<b>Екологічне управління та моніторинг</b>					
41.	Послаблення правових і економічних механізмів контролю в галузі екологічної безпеки			●	-
42.	Погіршення екологічного моніторингу			●	-
43.	Усунення наявних механізмів впливу органів місцевого самоврядування на процеси техногенного навантаження			●	-
44.	Стимулювання розвитку екологічно небезпечних галузей виробництва			●	-
<b>Інше</b>					
45.	Підвищення рівня використання будь-якого виду природних ресурсів	●			+
46.	Суттєве вилучення будь-якого невідновного ресурсу		●		+
47.	Збільшення споживання значних обсягів палива або енергії		●		+
48.	Суттєве порушення якості природного середовища		●		+
49.	Появу можливостей досягнення короткотермінових цілей, які ускладнюватимуть досягнення довготривалих цілей у майбутньому		●		+
50.	Такі впливи на довкілля або здоров'я людей, які самі по собі будуть незначними, але у сукупності викличуть значний негативний екологічний ефект, що матиме значний негативний прямий або опосередкований вплив на добробут людей		●		+

Пом'якшення негативних екологічних впливів будівельних відходів на довкілля можливе шляхом впровадження світових практик поводження з такими відходами, до яких належать наступні:

1. Залучення спеціальних професіоналів (екологічних менеджерів) для вирішення питань екологічно дружнього поводження з будівельними відходами.

2. Запровадження збірного або зовнішнього виробництва будівельних компонентів і запровадження новітніх технологій, матеріалів, що дозволяють зменшити будівельні відходи.

3. Тісна координація між екологічним менеджером, клієнтом, підрядниками та іншими зацікавленими сторонами на етапах планування, проєктування та будівництва, а також завершення життєвого циклу будівельних конструкцій.

4. Впровадження ефективної практики управління будівельними відходами на місці та поширення обізнаності серед учасників будівельних робіт.

5. Повторне використання та переробка матеріалів.

6. Запровадження заходів стимулювання екологічно дружнього поводження з відходами.

7. Розширення і запровадження норм і специфікацій екологічного будівництва.

8. Підвищення плати за утворення будівельних відходів підприємств. Запровадження заходів дієвого впливу для організацій, які порушують законодавчі норми поводження з відходами.

9. Розробка політики мінімізації будівельних відходів.

10. Розробка онлайн калькулятора з вимірюванням розміру роботи та використанням належної кількості будівельних матеріалів допоможе зменшити кількість утворюваних будівельних відходів.

11. Дотримання належного зберігання будівельних матеріалів, ефективний і періодичний нагляд на місці.

12. Врахування впливу на навколишнє середовище під час проєктування та прагнення досягти його оптимізації.

13. Проведення навчань для персоналу, задіяного у будівництві, щодо стратегій мінімізації утворення будівельних відходів.

14. Пам'ятати про економічні, соціальні та екологічні наслідки поводження з будівельними відходами на всіх етапах життєвого циклу проєкту.

## Висновки

Проведене дослідження заповнює прогалину в знаннях про вплив будівельних відходів на довкілля. Отримана систематична і всебічна ієрархія потенційних впливів на всі сфери довкілля, включаючи соціальну, і рекомендації щодо пом'якшення наслідків можуть бути використані зацікавленими сторонами будівництва та державними організаціями як керівництво для дії. Це особливо актуально в Україні, в якій внаслідок воєнних дій щодня руйнуються споруди внаслідок ракетних атак, вибухів і застосування всіх видів зброї. Вплив на атмосферне повітря, водне середовище, ґрунти, земельні ресурси і біорізноманіття відбувається не тільки в процесі цивільного будівництва, а більшою мірою в сьогоденнішніх реаліях в процесі руйнування і утворення будівельного сміття. Майбутні дослідження, які мають на меті поглибити екологічну оцінку процесу і наслідків утворення будівельних відходів, можуть підтвердити свої висновки з використанням результатів цього дослідження.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шibaєва Н. В., Бабан Т. О., Марченко М. В. (2023). Управління будівельними відходами на принципах циркулярної економіки. *Актуальні проблеми інноваційної економіки та права*, № 4, С. 66-74.
2. Нонік Л.Ю., Пацева І.Г., Пічкур Т.В. (2023). Розроблення стратегії управління відходами руйнацій в умовах воєнного стану. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*, № 4, С. 40–47.
3. Фісуненко, П. А., & Герасимова, О. Л. (2022). Напрями зменшення ризиків воєнного екоциду за допомогою рециклінгу будівельних відходів в девелопменті нерухомості. *Економіка та суспільство*, (45).
4. Розвиток будівельної галузі м.Івано-Франківська. Досягнення та проблеми. Офіційний сайт Івано-Франківська <https://www.mvk.if.ua/uploads/files/news080812-2.pdf>

5. Решетченко, А. І., Телюра, Н. О., & Коновалов, А. В. (2023). Підвищення екологічної безпеки урбосистем при реалізації будівельної діяльності на засадах сталого розвитку. *Науковий вісник будівництва*, 1(109), 37-41.
6. Jekale, W. (2004). Performance for public construction projects in developing countries: Federal road and educational building projects in Ethiopia. *Norwegian University of Science & Technology*.
7. Hasmori, M. F., Zin, A. F. M., Nagapan, S., Deraman, R., Abas, N., Yunus, R., & Klufallah, M. (2020). The on-site waste minimization practices for construction waste. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 713, No. 1, p. 012038). IOP Publishing.
8. Zoghi, M., & Kim, S. (2020). Dynamic modeling for life cycle cost analysis of BIM-based construction waste management. *Sustainability*, 12(6), 2483.
9. Luangcharoenrat, C.; Intrachooto, S.; Peansupap, V.; Sutthinarakorn, W. (2019). Factors Influencing Construction Waste Generation in Building Construction: Thailand's Perspective. *Sustainability* 11, 3638. <https://doi.org/10.3390/su11133638>
10. Tafesse, S., Adugna, T. (2021). Critical factors causing material wastes in building construction projects. *J. Eng. Sci.* 17 (2), 1–16.
11. Götttsche, J., & Kelly M. (2020). Assessing the impact of resource efficiency on selected case studies in Ireland. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Waste and Resource Management* 173:4, 107-118.
12. Gul Polat, Atilla Damci, Harun Turkoglu, Asli Pelin Gurgun (2017). Identification of Root Causes of Construction and Demolition (C&D) Waste: The Case of Turkey, *Procedia Engineering*, Volume 196, 2017, Pages 948-955, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.035>
13. Bribián, I. Z., Capilla, A. V., & Usón, A. A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and environment*, 46(5), 1133-1140.
14. Jaime Solís-Guzmán, Madelyn Marrero, Maria Victoria Montes-Delgado, Antonio Ramírez-de-Arellano (2009). A Spanish model for quantification and management of construction waste, *Waste Management*, Volume 29, Issue 9, Pages 2542-2548, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.009>
15. Hongping Yuan, Abdol R. Chini, Yujie Lu, Liyin Shen, (2012). A dynamic model for assessing the effects of management strategies on the reduction of construction and demolition waste, *Waste Management*, Volume 32, Issue 3, Pages 521-531, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.006>
16. Asif M., Muneer T., Kelley R. (2007). Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 3, Pages 1391-1394, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.023>
17. Md. Uzzal Hossain, S. Thomas Ng, (2019). Influence of waste materials on buildings' life cycle environmental impacts: Adopting resource recovery principle, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 142, Pages 10-23, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.010>
18. Ignacio, Z.B., Antonio, V.C., Alfonso, A.U. (2011). Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build. Environ.* 46 (5), 1133–1140.
19. Nguimalet, CR (2007). Population and spatial growth: diagnosis and implications for urban management in Bangui (Central African Republic). In: *Urban population, development and environment dynamics in developing countries*, pp. 1–16. [http://www.cicred.org/Eng/Seminars/Details/Seminars/PDE2007/Papers/Nguimalet\\_Engl.pdf](http://www.cicred.org/Eng/Seminars/Details/Seminars/PDE2007/Papers/Nguimalet_Engl.pdf).
20. Aboginije, A., Aigbavboa, C., Thwala, W., & Samuel, S. (2020). Determining the impact of construction and demolition waste reduction practices on green building projects in Gauteng province, South Africa. *Proceedings of International Engineering & Operations Management, Dubai, UAE*, 10-12.

21. Olusanjo OF, Panos G, Ezekiel C (2014). Quantitative analysis of the sources of construction waste. *J Constr Eng* 9:651060.
22. Yeheyis, M., Hewage, K., Alam, M.S. *et al.* An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Techn Environ Policy* 15, 81–91 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0481-6>
23. ELARD, GAA, (2009). Environmental and Social Impact Assessment of Construction and Operation of Syria Cement Plant and Captive Power Plant, and Associated Quarrying Activities. Syrian cement company, Syria (scc).
24. Cheonghoon Baek, Sang-Hoon Park, Michiya Suzuki, Sang-Ho Lee, (2013). Life cycle carbon dioxide assessment tool for buildings in the schematic design phase, *Energy and Buildings*, Volume 61, Pages 275-287, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.025>
25. Saheed O. Ajayi, Lukumon O. Oyedele, Muhammad Bilal, Olugbenga O. Akinade, Hafiz A. Alaka, Hakeem A. Owolabi, Kabir O. Kadiri, (2015). Waste effectiveness of the construction industry: Understanding the impediments and requisites for improvements, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 102, Pages 101-112, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.001>
26. Memon, M.A., *et al.* (2020). Identification of causes for construction waste material in construction projects of Sindh province. *Int. Res. J. Innov. Eng. Technol. (IRJIET)* 4 (10), 7–13. <https://doi.org/10.47723/kcmj.v16i2.255>
27. Ghaleb, J.S., *et al.* (2021). Understanding the causes of material wastage in the construction industry. *Jordan J. Civil Eng.* 5 (2), 180–192.
28. Eze, E.C., Seghosime, R., Eyong, O.P., Loya, O.S. (2016). Assessment of materials waste in the construction industry: a view of construction operatives, tradesmen and artisans in Nigeria. *Int. J. Eng. Sci.* 6 (4), 32–47.
29. Aslam, M. S., Huang, B., & Cui, L. (2020). Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of environmental management*, 264, 110445.
30. Josimovic, B., Maric, I., Milijic, S. (2014). Multi-criteria Evaluation in Strategic Environmental Assessment for Waste Management Plan, a Case Study: the City of Belgrade. *Waste Manag.*

Стаття надійшла до редакції 01.06.2024 і прийнята до друку після рецензування 04.09.2024

## REFERENCES

1. Shybayeva, N.V., Baban, T.O., & Marchenko, M.V. (2023). Upravlinnya budivel'nyh vidkhodamy na pryntsyakh tsyrkulyarnoy ekonomiky. *Aktual'ni problemy innovatsiynoyi ekonomiky ta prava*, 4, 66-74 [in Ukrainian].
2. Nonik, L.YU., Patseva, I.H., & Pichkur, T.V. (2023). Rozroblennya stratehiyi upravlinnya vidkhodamy ruynatsiy v umovakh voyennoho stanu. *Ekolohichna bezpeka ta tekhnolohiyi zakhystu dokillya*, 4, 40–47 [in Ukrainian].
3. Fisunenko, P.A., & Herasymova, O.L. (2022). Napryamy zmeshchennya ryzykiv voyennoho ekotsydu za dopomohoyu retskyklinhu budivel'nykh vidkhodiv v developmenti nerukhomosti. *Ekonomika ta suspil'stvo*, (45) [in Ukrainian].
4. Rozvytok budivel'noyi haluzi m. Ivano-Frankivs'ka. Dosyahnennya ta problemy. Ofitsiyyny sayt Ivano-Frankivs'ka. <https://www.mvk.if.ua/uploads/files/news080812-2.pdf> [in Ukrainian].
5. Reshetchenko, A.I., Telyura, N.O., & Konovalov, A.V. (2023). Pidvyshchennya ekolohichnoyi bezpeky urbosystem pry realizatsiyi budivel'noyi diyal'nosti na zasadakh staloho rozvytku. *Naukovyy visnyk budivnytstva*, 1(109), 37-41 [in Ukrainian].
6. Jekale, W. (2004). Performance for public construction projects in developing countries: Federal road and educational building projects in Ethiopia. *Norwegian University of Science & Technology*.

7. Hasmori, M. F., Zin, A. F. M., Nagapan, S., Deraman, R., Abas, N., Yunus, R., & Klufallah, M. (2020). The on-site waste minimization practices for construction waste. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 713, No. 1, p. 012038). IOP Publishing.
8. Zoghi, M., & Kim, S. (2020). Dynamic modeling for life cycle cost analysis of BIM-based construction waste management. *Sustainability*, 12(6), 2483.
9. Luangcharoenrat, C.; Intrachooto, S.; Peansupap, V.; & Sutthinarakorn, W. (2019). Factors Influencing Construction Waste Generation in Building Construction: Thailand's Perspective. *Sustainability* 11, 3638. <https://doi.org/10.3390/su11133638>
10. Tafesse, S., & Adugna, T. (2021). Critical factors causing material wastes in building construction projects. *J. Eng. Sci.*, 17 (2), 1–16.
11. Götttsche, J., & Kelly M. (2020). Assessing the impact of resource efficiency on selected case studies in Ireland. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Waste and Resource Management*, 173:4, 107-118.
12. Gul Polat, Atilla Damci, Harun Turkoglu, & Asli Pelin Gurgun (2017). Identification of Root Causes of Construction and Demolition (C&D) Waste: The Case of Turkey. *Procedia Engineering*, 196, 948-955. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.035>
13. Bribián, I. Z., Capilla, A. V., & Usón, A. A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and environment*, 46(5), 1133-1140.
14. Jaime Solís-Guzmán, Madelyn Marrero, Maria Victoria Montes-Delgado, & Antonio Ramírez-de-Arellano (2009). A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Management*, 29(9), 2542-2548. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.009>
15. Hongping Yuan, Abdol R. Chini, Yujie Lu, & Liyin Shen, (2012). A dynamic model for assessing the effects of management strategies on the reduction of construction and demolition waste. *Waste Management*, 32, 3, 521-531. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.006>
16. Asif, M., Muneer, T., & Kelley, R. (2007). Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Building and Environment*, 42(3), 1391-1394. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.023>
17. Md. Uzzal Hossain, S. & Thomas Ng, (2019). Influence of waste materials on buildings' life cycle environmental impacts: Adopting resource recovery principle. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.010>
18. Ignacio, Z.B., Antonio, V.C., & Alfonso, A.U. (2011). Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build. Environ.* 46 (5), 1133–1140.
19. Nguimalet, CR. (2007). Population and spatial growth: diagnosis and implications for urban management in Bangui (Central African Republic). In: *Urban population, development and environment dynamics in developing countries*, (pp. 1–16). [http://www.cicred.org/Eng/Seminars/Details/Seminars/PDE2007/Papers/Nguimalet\\_Engl.pdf](http://www.cicred.org/Eng/Seminars/Details/Seminars/PDE2007/Papers/Nguimalet_Engl.pdf).
20. Aboginije, A., Aigbavboa, C., Thwala, W., & Samuel, S. (2020). Determining the impact of construction and demolition waste reduction practices on green building projects in Gauteng province, South Africa. *Proceedings of International Engineering & Operations Management, Dubai, UAE*, 10-12.
21. Olusanjo, OF., Panos, G., & Ezekiel, C. (2014). Quantitative analysis of the sources of construction waste. *J Constr Eng* 9:651060.
22. Yeheyis, M., Hewage, K., Alam, M.S. et al. (2013). An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Techn Environ Policy*, 15, 81–91. <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0481-6>
23. ELARD, GAA, (2009). Environmental and Social Impact Assessment of Construction and Operation of Syria Cement Plant and Captive Power Plant, and Associated Quarrying Activities. Syrian cement company, Syria (sc).

24. Cheonghoon Baek, Sang-Hoon Park, Michiya Suzuki, & Sang-Ho Lee, (2013). Life cycle carbon dioxide assessment tool for buildings in the schematic design phase. *Energy and Buildings*, 61, 275-287. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.025>
25. Saheed O. Ajayi, Lukumon O. Oyedele, Muhammad Bilal, Olugbenga O. Akinade, Hafiz A. Alaka, Hakeem A. Owolabi, & Kabir O. Kadiri (2015). Waste effectiveness of the construction industry: Understanding the impediments and requisites for improvements. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.001>
26. Memon, M.A., et al. (2020). Identification of causes for construction waste material in construction projects of Sindh province. *Int. Res. J. Innov. Eng. Technol. (IRJIET)*, 4 (10), 7–13. <https://doi.org/10.47723/kcmj.v16i2.255>
27. Ghaleb, J.S., et al. (2021). Understanding the causes of material wastage in the construction industry. *Jordan J. Civil Eng.* 5 (2), 180–192.
28. Eze, E.C., Seghosime, R., Eyong, O.P., & Loya, O.S. (2016). Assessment of materials waste in the construction industry: a view of construction operatives, tradesmen and artisans in Nigeria. *Int. J. Eng. Sci.* 6 (4), 32–47.
29. Aslam, M. S., Huang, B., & Cui, L. (2020). Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of environmental management*, 264, 110445.
30. Josimovic, B., Maric, I., & Milijic, S. (2014). Multi-criteria Evaluation in Strategic Environmental Assessment for Waste Management Plan, a Case Study: the City of Belgrade. *Waste Manag.*

*The article was received 01.06.2024 and was accepted after revision 04.09.2024*

**Майкович Володимир Євгенович**

аспірант кафедри екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-6373-270X>

**e-mail:** volodymyr.maikovych@nung.edu.ua

**Адаменко Ярослав Олегович**

доктор технічних наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5665-7958>

**e-mail:** yaroslav.adamenko@nung.edu.ua

УДК 502.31:504.05

**Stanislav Adamenko**, Post-Graduate of Department of Ecology

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1678-0036>

*e-mail*: stanislav.adamenko-a101-23@nung.edu.ua

**Liudmyla Arkhylova**, Doctor of Technical Science, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8725-6943>

*e-mail*: konsevich@ukr.net

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

## STUDY OF PATTERNS OF PM<sub>2.5</sub> AND PM<sub>10</sub> CHANGES IN THE ATMOSPHERIC AIR OF IVANO-FRANKIVSK REGION

**Abstract.** *The purpose of this research is to analyse the temporal patterns of changes in concentrations of dust particles – aerosols, regression modeling of the interdependence of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at the level of instantaneous, average hourly, average daily and average weekly concentrations, and assessment of the impact of the anthropogenic component of dust pollution of atmospheric air in the Ivano-Frankivsk region on regularities of the temporal distribution of these shares.*

*The database for the study included measurements of the concentration of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> every hour at four Ecocity public monitoring stations: in the central part of the city of Ivano-Frankivsk, in the village of Bovshiv within the influence of the Burshtyn TPP, in the village of Broshniv-Osada within the influence of the woodworking enterprise "SVISS KRONO" and within the recreational territory of the village of Mykulychyn, Nadvirnyan district. The general regularity of the temporal distribution of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> was established for all posts for daily fluctuations – the highest concentrations are observed at night, the lowest – during the period of maximum daily temperatures. It has been proven by actual data that the greater the level of atmospheric air pollution (the greater the anthropogenic component of PM), the higher the daily concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and the more often the one-time standards of solid suspended particles are exceeded.*

*According to the data of monitoring stations from the territories with different anthropogenic influence, functional dependences of PM<sub>2.5</sub> content on PM<sub>10</sub> content were obtained for instantaneous values, hourly average values, daily average values, and weekly average values. The scientific novelty of the conducted research consists in the establishment of identical functional interdependence of temporal changes in concentrations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> dust particles within a conditionally clean area and within the limits of the influence of stationary sources of pollution with a high level of direct regression dependence and a coefficient of determination greater than 0.9 in all cases. This allows us to conclude that the temporal patterns of changes in both PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> will not differ in clean and polluted air conditions for the Ivano-Frankivsk region. In conditions of incomplete data on the temporal distribution of the concentration of PM<sub>10</sub>, the obtained equations can be used to forecast the temporal distribution of the concentration of PM<sub>2.5</sub>.*

**Keywords:** *time regularities, concentrations of dust particles, functional dependencies.*



С.Я. Адаменко, Л.М. Архипова

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
м. Івано-Франківськ, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІН $PM_{2,5}$ ТА $PM_{10}$ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ ПРИКАРПАТТЯ

**Анотація.** Мета даного дослідження – проведення аналізу часових закономірностей змін концентрацій пилових часток – аерозолів, регресійне моделювання взаємозалежності  $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$  на рівні миттєвих, середньогодинних, середньодобових та середньотижневих концентрацій та оцінка впливу антропогенної складової пилового забруднення атмосферного повітря в Івано-Франківській області на закономірності часового розподілу цих часток.

База даних для дослідження включала виміри концентрації  $PM_{10}$  та  $PM_{2,5}$  через кожну годину на чотирьох станціях громадського моніторингу Есосіту: в центральній частині м. Івано-Франківська, в с. Бовшів в межах впливу Буришинської ТЕС, в селищі Брошнів-Осада в межах впливу деревообробного підприємства «СВИСС КРОНО» та в межах рекреаційної території с. Микуличин Надвірнянського району. Встановлена загальна закономірність часового розподілу  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  для всіх постів для добових коливань – найвищі концентрації спостерігаються в нічний час, найнижчі – в період максимальних добових температур. Доведено фактичними даними, що чим більший рівень забруднення атмосферного повітря (чим більша антропогенна складова  $PM$ ), тим вищі добові концентрації  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  і тим частіше перевищення разових нормативів твердих завислих часток.

За даними станції моніторингу з території із різним антропогенним впливом були отримані функціональні залежності вмісту  $PM_{2,5}$  від вмісту  $PM_{10}$  для миттєвих значень, середньогодинних значень, середньодобових значень та середньотижневих значень. Наукова новизна проведеного дослідження полягає у встановленні ідентичних функціональних взаємозалежностей часових змін концентрацій частинок пилу  $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$  в межах умовно чистої території та в межах впливу стаціонарних джерел забруднення із високим рівнем прямої регресійної залежності та коефіцієнтом детермінації більше 0,9 у всіх випадках. Це дозволяє зробити висновок про те, що часові закономірності змін як  $PM_{2,5}$ , так і  $PM_{10}$  не будуть відрізнятися в умовах чистого повітря і забрудненого для Івано-Франківської області. В умовах неповних даних за часовим розподілом концентрації  $PM_{10}$  за отриманими рівняннями можна здійснювати прогноз часового розподілу концентрації  $PM_{2,5}$ .

**Ключові слова:** часові закономірності, концентрації пилових часток, функціональні залежності.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.47-58>

### Вступ

До основних антропогенних забруднювачів повітря, що мають значний ризик для здоров'я, відносять тверді мікрочастинки діаметром 10; 2,5 мікрона та менше ( $PM_{10}$ ;  $PM_{2,5}$ ) [1]. Тверді частинки  $PM$  – також відомі як частки атмосферних аерозолів, атмосферні тверді частинки, тверді частинки або завислі тверді частинки (ТЧ або  $PM$ ) – є мікроскопічними частинками з твердої або рідкої речовини, що знаходяться в завислому стані в атмосферному повітрі [2].

Доведена їх небезпека для організму людини полягає у здатності глибоко проникати в легені й потрапляти в кров; спричиняти захворювання як серцево-судинної, так і дихальної системи; провокувати інсульт, рак легенів і хронічну обструктивну хворобу легень [3].

Вміст цих речовин у повітрі нормується рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я [4], в яких безпечними вважаються рівні  $PM_{2,5}$   $5 \text{ мкг/м}^3$  (ці рівні періодично переглядаються, останній перегляд ВООЗ від 22 вересня 2021 року). Внутрішні українські нормативи з огляду на Євроінтеграційний курс повинні відповідати європейським директивам [5]. Директива 2008/50/ЕС «Про якість атмосферного повітря для Європи» встановлює граничне середньорічне значення для  $PM_{2,5}$  на рівні  $20 \text{ мкг/м}^3$ . Діюче в ЄС середньодобове граничне значення  $PM_{10}$  складає  $50 \text{ мкг/м}^3$  (за умови не більше 35 перевищень на рік) [6].

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

Джерелами утворення пилових часток є природна та антропогенна діяльності.  $PM_{2,5}$  і  $PM_{10}$  можуть адсорбувати на своїх поверхнях інші шкідливі речовини й викликати додаткові негативні наслідки для здоров'я після їх потрапляння в організм людини [7]. Атмосферні аерозолі є продуктом складної сукупності фізико-хімічних процесів у атмосфері [8]. Велика кількість аерозолів утворюється в результаті природних процесів [9]. До природних джерел належать аерозолі морської солі, вулкани, лісові пожежі, пилові бурі, рослинність і біологічні аерозольні частинки [10]. Антропогенні джерела твердих мікрочастинок включають викиди транспортних засобів, спалювання твердого палива і побутової біомаси, промислові викиди, сільськогосподарську діяльність [11, 12].

У середньому ґрунтовий покрив та рослинний світ дають понад 40% атмосферних аерозолів, водна поверхня – 10-20%, промислові підприємства – до 20%, транспорт – трохи більше 10% [13]. Максимальний антропогенний внесок припадає на енергетику та транспорт, які дають 2/3 загальної кількості частинок антропогенного походження [14, 15].

У багатьох регіонах світу виявлені чіткі сезонні закономірності динаміки концентрації  $PM_{2,5}$  і  $PM_{10}$  [16, 17]. Науковцями різних країн встановлено, що просторово-часові коливання концентрацій  $PM_{2,5}$  і  $PM_{10}$  є результатом різних типів і компонентів антропогенних впливів переважно від спалювання палива [18, 19, 20]. Але головною причиною просторово-часових коливань концентрацій  $PM_{2,5}$  і  $PM_{10}$  є природні чинники, серед яких атмосферні процеси мають провідну роль [21, 22]. Іноді відбуваються зміни природних джерел викидів через екстремальні погодні явища, такі як лісові пожежі та пилові бурі, що переносяться вітром [23, 24]. Провідними джерелами антропогенних глобальних викидів  $PM_{2,5}$  і  $PM_{10}$  у всьому світі є спалювання викопного палива в комунальному господарстві, промисловості та для виробництва електроенергії [25]. Основними джерелами високих рівнів твердих мікрочастинок у великих містах є як викиди транспортних засобів, так і викиди від систем центрального опалення [26, 27].

## Мета роботи

Це дослідження має на меті проаналізувати часові закономірності зміни концентрацій пилових часток, змодельовати взаємозалежність  $PM_{2.5}$  і  $PM_{10}$  та оцінити антропогенну складову пилового забруднення атмосферного повітря в Івано-Франківській області.

## Матеріали і методи

База даних для дослідження включала виміри концентрації  $PM_{10}$  та  $PM_{2.5}$  разом із температурою повітря, атмосферним тиском, відносною вологістю повітря через кожну годину по кожному параметру зі станцій громадського моніторингу Esocity в центральній частині м. Івано-Франківська, в с. Бовшів поблизу Бурштинської ТЕС, в селищі Брошнів-Осада поблизу деревообробного підприємства та в межах рекреаційної території с. Микуличин Надвірнянського району. Поблизу останньої станції спостереження відсутні стаціонарні джерела забруднення та автомагістралі.

## Виклад основного матеріалу

Початковий аналіз проводився за даними станції м. Івано-Франківська. Середньогодинні значення концентрації частинок пилу  $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$  були отримані із загальної кількості більше 7000 значень за 2019 р. зі станції громадського моніторингу в центральній частині міста Івано-Франківська. Статистичний розподіл середньогодинних значень (кожне значення отримано як середнє арифметичне з понад 600 показників цієї години протягом року) доводить, що концентрація  $PM_{2.5}$  має тенденцію до зниження протягом ранкових і денних годин, досягаючи мінімуму близько 16-17 години, а потім починає швидко зростати ввечері та досягає максимальних значень близько опівночі (23-24 години) (рис. 1). Мінімальне та максимальні значення в межах урбанізованої території (станція розташована в центрі м. Івано-Франківська) коливаються від 6,5 до 15  $мкг/м^3$ , що знаходиться в допустимих межах якості повітря (табл. 1).



Рис. 1. Добові зміни концентрації частинок пилу  $PM_{2.5}$  в м. Івано-Франківську

Таблиця 1. Нормування пилового забруднення атмосферного повітря, мкг/м<sup>3</sup> [4, 5, 6]

Речовина	Час осереднення	Україна	ЄС	США	ВООЗ
PM10	24 год.	0,05	0,05	0,15	0,05
	1 рік	-	0,04		0,02
PM2,5	24 год.	0,025	-	0,035	0,025
	1 рік	-	0,025	0,015	0,015

Для оцінки релевантності отриманих результатів аналогічний розподіл середньогодинних значень за 18 жовтня 2022 року був отриманий зі станцій, які розташовані (рис. 2):

- в с. Бовшів поблизу Бурштинської ТЕС – найбільшого забруднювача атмосферного повітря на Прикарпатті (ряд 1);
- в селищі Брошнів-Осада (ряд 3) поблизу діючого деревообробного підприємства, що входить в п’ятірку найбільших забруднювачів атмосферного повітря на Прикарпатті;
- в межах рекреаційної території Надвірнянського району (ряд 2) – контрольна точка без антропогенної складової забруднення повітря;
- в межах м. Івано-Франківська (ряд 4) (та ж станція №1 – урбанізована територія із забрудненням від транспорту без перевищення нормативних показників).

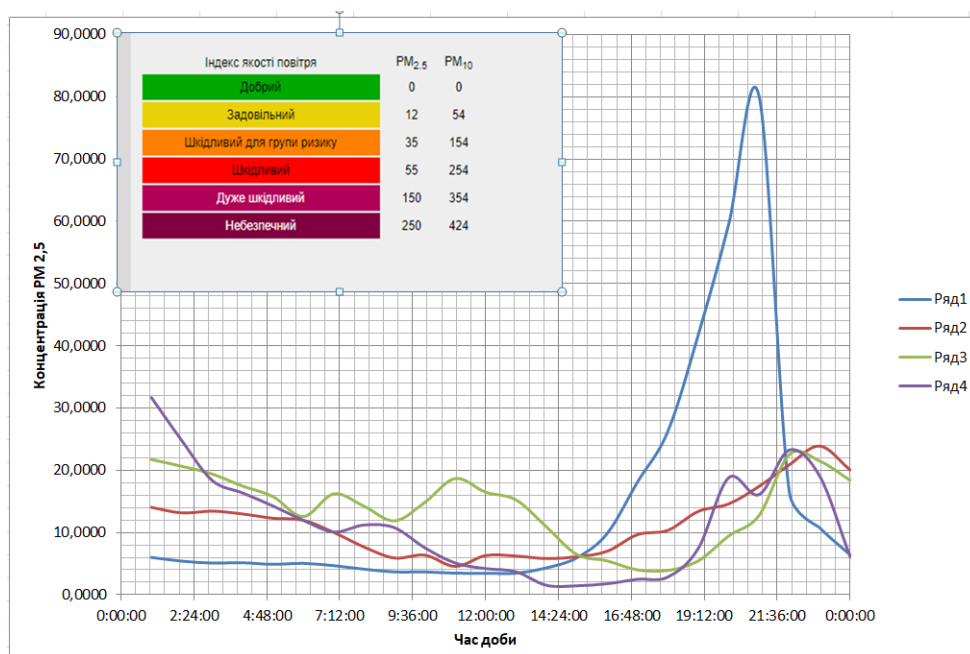


Рис. 2. Порівняння закономірностей добової зміни концентрацій PM<sub>2,5</sub> в точках з різним рівнем антропогенного навантаження

Particulate matter (PM) – це мікроскопічні тверді частинки. Фактично – це все те, що є у повітрі, що не є газом і складається з величезного різноманіття хімічних сполук та матеріалів, деякі з яких можуть бути токсичними [3, 21].

Аналіз отриманих даних показує, що в межах рекреаційної території спостерігається найнижчий рівень концентрації  $PM_{2,5}$  та аналогічний (див. рис. 1) добовий розподіл середньогодинних значень, отриманий з масиву декількох тисяч вимірювань. Загальна закономірність для всіх постів для конкретної доби – найвищі концентрації спостерігаються в нічний час, найнижчі – в період максимальних добових температур.

Порівняння даних постів моніторингу підтверджує висновок про те, що чим більший рівень забруднення атмосферного повітря (чим більша антропогенна складова  $PM$ ), тим вищі добові концентрації і тим частіше перевищення разових нормативів твердих завислих часток. Підтвердженням є максимальні пікові значення, що спостерігались на станції в с. Бовшів (на відстані до 3 км від стаціонарних джерел забруднення Бурштинської ТЕС), які сягали  $80 \text{ мкг/м}^3$ , що за індексом якості повітря відповідає дуже шкідливому рівню для громадського здоров'я.

Антропогенне забруднення деревообробного підприємства в закономірностях добових змін  $PM_{2,5}$  проявилось не стільки у перевищенні максимальних граничних концентрацій, скільки у зміні нормального розподілу. Тут спостерігаються декілька пікових значень (див. рис. 2). Можемо стверджувати, що ранкове підвищення з 6 до 14 години є аномальним для загальних закономірностей добових коливань аерозолів в атмосферному повітрі Прикарпаття і пов'язано із викидами деревообробного підприємства (станція моніторингу розташована на відстані 1,5 км від стаціонарних джерел викидів).

Надалі спробуємо порівняти отримані середньогодинні значення для  $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$  (рис. 3). Очікувана гіпотеза подібного розподілу підтвердилась, чого і слід було очікувати, оскільки  $PM_{10}$  включає  $PM_{2,5}$ .



Рис. 3. Порівняння середньогодинних змін концентрацій частинок пилу  $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$  в м. Івано-Франківську

$PM_{10}$  має також тенденцію до зниження протягом ранкових і денних годин, досягаючи мінімуму о 17 годині, а потім швидко зростає в часі та досягає максимальних значень о 24 годині. Мінімальне та максимальні значення в межах м. Івано-Франківська коливаються від 12,5 до 27  $\text{мкг/м}^3$ , що знаходиться в межах задовільної якості повітря.

Для порівняння добових змін і взаємозалежності концентрацій часток  $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$  були проаналізовані дані за добу 31 жовтня 2022 р. зі станції в с. Бовшів, що відображають забруднення від Бурштинської теплової електростанції за переважаючою розою вітрів (рис. 4).

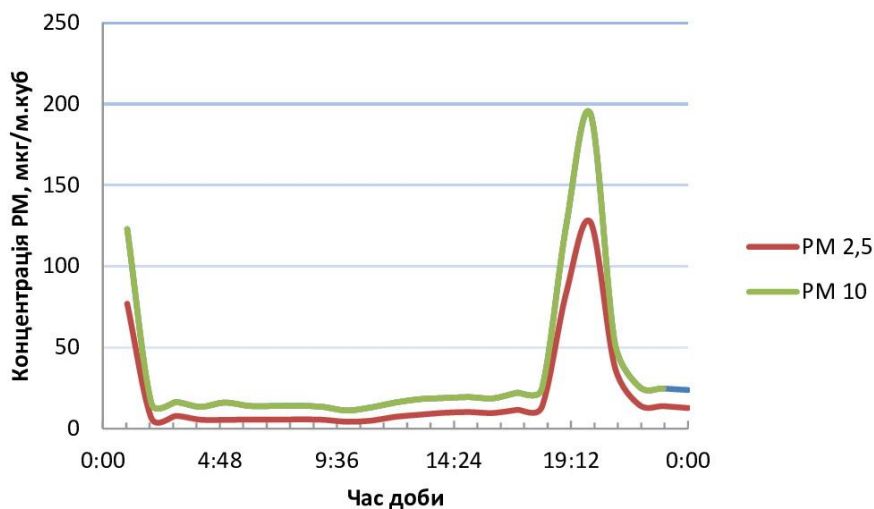


Рис. 4. Взаємозалежність миттєвих змін концентрацій частинок пилу  $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$  в межах впливу стаціонарних джерел забруднення БуТЕС

Амплітуда добових значень  $PM_{10}$  коливається від мінімального значення  $18 \text{ мкг/м}^3$  о 13 годині до  $194 \text{ мкг/м}^3$  о 20 годині, при цьому перевищення добових допустимих значень спостерігається також з 19 до 21 години, а також опівночі. Амплітуда добових значень  $PM_{2,5}$  коливається від мінімального значення  $8 \text{ мкг/м}^3$  о 13 годині до  $127 \text{ мкг/м}^3$  о 20 годині, при цьому перевищення добових допустимих значень спостерігається також з 19 до 21 години та опівночі.

Отже, наведені дані зі станції моніторингу, де спостерігається суттєве техногенне забруднення атмосферного повітря пиловими частками від спалювання вугілля на тепловій електростанції, доводять чітку взаємозалежність часток  $PM_{10}$  та  $PM_{2,5}$ . Обчислений коефіцієнт кореляції складає 0,99.

Обидва показники ( $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$ ) мають схожі денні тренди, де концентрація зменшується вдень і збільшується ввечері та вночі. Хоча абсолютні значення для  $PM_{10}$  вищі за  $PM_{2,5}$ , обидва показники мають схожі форми денних циклів. Ці спостереження вказують на те, що джерела і процеси, які впливають на денні концентрації  $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$ , є подібними або взаємопов'язаними.

Отже, проведено дослідження взаємозалежності добових змін концентрацій частинок пилу  $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$  в межах умовно чистої території та в межах впливу стаціонарних джерел забруднення показує високий рівень прямої кореляційної залежності на рівні більше 0,95. Це дозволяє зробити висновок про те, що часові закономірності змін як  $PM_{2,5}$  так і  $PM_{10}$  не будуть відрізнятися в природних умовах чистого повітря і антропогенно

перетвореного. Тобто, в умовах неповних даних за часовим розподілом концентрації PM10 можна здійснювати прогноз часового розподілу концентрації PM2,5 і навпаки.

Використаємо лінійну регресію (дані станції с. Микуличин), щоб знайти математичну залежність між середньогодинними значеннями PM2,5 та PM10 для рекреаційної території. У цьому аналізі PM10 буде виступати як незалежна змінна, а PM2,5 – як залежна. Математична залежність між середніми годинними значеннями PM2,5 та PM10 описується наступним рівнянням:

$$PM_{2,5} = 0,5501 \times PM_{10} - 0,0757, \quad (1)$$

де PM2,5 і PM10 вимірюються у мкг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт детермінації  $R^2$  для цієї моделі становить приблизно 0,9794, що свідчить про лінійний зв'язок між PM2,5 та PM10 на погодинному рівні.

В подальшому ми розглянули середньодобові значення для PM2,5 та PM10 для станції в с. Брошнів-Осада, що відображають періодичні забруднення від стаціонарних джерел деревообробного комбінату (рис. 5).

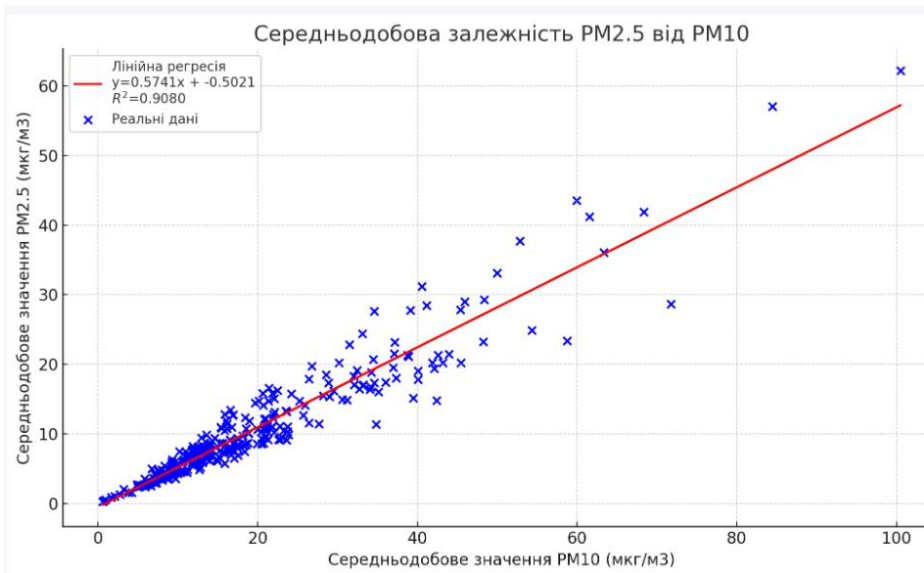


Рис. 5. Залежність середньодобових змін концентрацій частинок пилу PM2,5 та PM10 для території з антропогенним навантаженням

Середньодобові зміни концентрацій частинок пилу пов'язані лінійною залежністю із коефіцієнтом регресії 0,9. Математична залежність між середньодобовими значеннями PM2,5 та PM10 описується наступним рівнянням:

$$PM_{2,5} = 0,5741 \times PM_{10} - 0,5021. \quad (2)$$

Коефіцієнт детермінації  $R^2$  для цієї моделі становить приблизно 0,9080, що свідчить про високий рівень зв'язку між PM2,5 та PM10 на рівні середньодобових значень.

Для оцінки взаємозв'язку середньотижневих значень були використані дані з рекреаційної незабрудненої території (станція в с. Микуличин Надвірнянського району). Після обчислення середньотижневих значень для PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> було побудовано графічне представлення залежності між PM<sub>10</sub> та PM<sub>2,5</sub> (рис. 6). За допомогою лінійної регресії встановлено математичну залежність (3).



Рис. 6. Залежність середньотижневих змін концентрацій частинок пилу PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> для рекреаційної території без антропогенного навантаження

На графічному представленні усіх залежностей PM<sub>2,5</sub> від PM<sub>10</sub> сині крапки представляють реальні значення, червона лінія представляє лінійну регресію між цими значеннями.

Отримана математична залежність між середньотижневими значеннями PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> описується наступним рівнянням:

$$PM_{2,5} = 0,5948 \times PM_{10} - 0,8811. \quad (3)$$

Коефіцієнт детермінації  $R^2$  для цієї моделі становить приблизно 0,9172, що підтверджує високий рівень зв'язку між PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> на тижневому рівні.

## Висновки

Отже, в результаті проведених досліджень було доведено, що добовий розподіл концентрацій пилу в часі обох показників PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> має схожі тренди і закономірності, де концентрація зменшується вдень та зростає вночі. Для урбанізованої території м. Івано-Франківська та рекреаційних територій Прикарпаття на прикладі даних станції с. Микуличин абсолютні значення концентрацій не перевищують встановлених норм доброї та задовільної якості



повітря за Індексом якості повітря. Добові зміни показників PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub> в межах впливу стаціонарних джерел забруднення деревообробного підприємства та Бурштинської теплової електростанції демонструють значні коливання із виходом за межі встановлених нормативів. Найвищі миттєві перевищення концентрацій аерозолів спостерігаються вночі.

Загальна закономірність для всіх постів для конкретної доби – найвищі концентрації спостерігаються в нічний час, найнижчі – в період максимальних добових температур. Порівняння даних постів моніторингу підтверджує висновок про те, що чим більший рівень забруднення атмосферного повітря (чим більша антропогенна складова РМ), тим вищі добові концентрації і тим частіше перевищення разових нормативів твердих завислих часток. Підтвердженням є максимальні пікові значення, що спостерігались на станції в с. Бовшів (на відстані до 3 км від стаціонарних джерел забруднення Бурштинської ТЕС), які сягали 80 мкг/м<sup>3</sup>, що за індексом якості повітря відповідає дуже шкідливому рівню для громадського здоров'я.

За даними станцій моніторингу з території із різним антропогенним впливом були отримані функціональні залежності вмісту PM<sub>2,5</sub> від вмісту PM<sub>10</sub> для миттєвих значень, середньогодинних значень, середньодобових значень та середньотижневих значень. У всіх випадках значення коефіцієнтів детермінації для регресійних моделей складає більше 0,9.

Проведене дослідження часових змін і взаємозалежності аерозольних часток в атмосферному повітрі дозволяє зробити висновок, що джерела і процеси, які впливають на характер розподілу концентрації PM<sub>2,5</sub> та PM<sub>10</sub>, є подібними та взаємопов'язаними. Ймовірно, часові зміни концентрацій аерозолів підпорядковуються добовим змінам метеорологічних параметрів. Дослідження цього є предметом наших подальших досліджень.

## REFERENCES

1. European Commission. (2019). REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. Retrieved from [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowerEU-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowerEU-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en)
2. Liu, Y., Ma, H., Zhang, N., & Li, Q. (2022). A systematic literature review on indoor PM<sub>2.5</sub> concentrations and personal exposure in urban residential buildings. *Heliyon*. 2022 Aug 10;8(8):e10174. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10174>
3. Golik, Yu.S., Maksyuta, N.S., Shevchenko, S.V., & Chepurko, A.O. (2021). Experimental study of atmospheric air pollution by PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> dust particles. In *Collection of materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Ecology. Environment Energy Saving", dedicated to the 203rd anniversary of the Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University (December 2-3, 2021)* (pp. 105-111). Poltava: NUPP (in Ukrainian). [Голік Ю.С., Максютя Н.С., Шевченко С.В., Чепурко А.О. Експериментальне дослідження забруднення атмосферного повітря пиловими частинками PM<sub>2.5</sub> та PM<sub>10</sub>. Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження», присвяченої 203-річчю Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (2-3 грудня 2021 року). Полтава: НУПП, 2021, С. 105-111].
4. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary. World Health Organization. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345334>

5. Europe's air quality status. (2022). European Environment Agency. Retrieved 2024, April, 22 from <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022>
6. Exceedance of air quality standards in Europe. European Environment Agency. Retrieved 2024, April, 22 from <https://www.eea.europa.eu/ims/exceedance-of-air-quality-standards>
7. Liu, C., Chen, R., Sera, F., et al. (2019). Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *The New England Journal of Medicine*, 381(8), 705–715. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364>
8. Calderón-Garcidueñas, L., Stommel, E.W., Rajkumar, R.P., et al. (2021). Particulate air pollution and risk of neuropsychiatric outcomes. What we breathe, swallow, and put on our skin matters. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11568. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111568>
9. Piao, M.J., Ahn, M.J., Kang, K.A. et al. (2018). Particulate matter 2.5 damages skin cells by inducing oxidative stress, subcellular organelle dysfunction, and apoptosis. *Arch Toxicol*, 92, 2077–2091. <https://doi.org/10.1007/s00204-018-2197-9>
10. Liu, Q., Xu, C., Ji, G., et al. (2017). Effect of exposure to ambient Pm2.5 pollution on the risk of respiratory tract diseases: A meta-analysis of cohort studies. *The Journal of Biomedical Research*, 31(2), 130–142. <https://doi.org/10.7555/JBR.31.20160071>
11. Zhao, J., Gao, Z., Tian, Z., et al. (2013). The biological effects of individual-level Pm(2.5) exposure on systemic immunity and inflammatory response in traffic policemen. *Occupational and environmental medicine*, 70(6), 426–431. <https://doi.org/10.1136/oemed-2012100864>
12. Wang, Y., Xiong, L., & Tang, M. (2017). Toxicity of inhaled particulate matter on the central nervous system: Neuroinflammation, neuropsychological effects and neurodegenerative disease. *Journal of applied toxicology*, 37(6), 644–667. <https://doi.org/10.1002/jat.3451>
13. Du, Y., Xu, X., Chu, M., Guo, Y., & Wang, J. (2016). Air particulate matter and cardiovascular disease: The epidemiological, biomedical and clinical evidence. *Journal of thoracic disease*, 8(1), 8–19. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2015.11.37>
14. Aryal, A., Harmon, A.C., & Dugas, T.R. (2021). Particulate matter air pollutants and cardiovascular disease: Strategies for intervention. *Pharmacology & therapeutics*, 223, 107890. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2021.107890>
15. Kastury, F., Smith, E., & Juhasz, A.L. (2017). A critical review of approaches and limitations of inhalation bioavailability and bioaccessibility of metal (loid)s from ambient particulate matter or dust. *Science of The Total Environment*, 574, 1054–1074. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.056>
16. Ali, M.U., Liu, G., Yousaf, B. et al. (2019). A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment. *Environ Geochem Health*, 41, 1131–1162. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0203-z>
17. Alemayehu, Y.A., Asfaw, S.L., & Terfie, T.A. (2020). Exposure to urban particulate matter and its association with human health risks. *Environmental science and pollution research international*, 27(22), 27491–27506. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09132-1>
18. Yu, W., Ye, T., Zhang, Y., et al. (2023). Global estimates of daily ambient fine particulate matter concentrations and unequal spatiotemporal distribution of population exposure: a machine learning modelling study. *Lancet Planet Health*, 7, 209–218. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00008-6)
19. McDuffie, E.E., Martin, R.V., Spadaro, J.V. et al. (2021). Source sector and fuel contributions to ambient PM2·5 and attributable mortality across multiple spatial scales. *Nature communications*, 12(1), 3594. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23853-y>
20. Chen, G., Guo, Y., Yue, X. et al. (2021). Mortality risk attributable to wildfire-related PM2·5 pollution: a global time series study in 749 locations. *The Lancet. Planetary health*, 5(9), 579–587. [https://doi.org/doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00200-X](https://doi.org/doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00200-X)

21. Weagle, C.L., Snider, G., Li, C. et al. (2018). Global sources of fine particulate matter: interpretation of PM<sub>2.5</sub> chemical composition observed by SPARTAN using a global chemical transport model. *Environmental Science & Technology*, 52(20), 11670-11681. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.8B01658>
22. Dabek-Zlotorzynska, E., Celo, V., Ding, L., et al. (2019). Characteristics and sources of PM<sub>2.5</sub> and reactive gases near roadways in two metropolitan areas in Canada. *Atmospheric Environment*, 218, 116980. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116980>
23. Park, E.H., Heo, J., Kim, H., & Yi, S.M. (2020). Long term trends of chemical constituents and source contributions of PM<sub>2.5</sub> in Seoul. *Chemosphere*, 251, 126371. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126371>
24. Heydari, S., Tainio, M., Woodcock, J., & de Nazelle, A. (2020). Estimating traffic contribution to particulate matter concentration in urban areas using a multilevel Bayesian meta-regression approach. *Environment international*, 141, 105800. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105800>
25. Li, J., & Tartarini, F. (2020). Changes in air quality during the COVID-19 lockdown in Singapore and associations with human mobility trends. *Aerosol Air Qual. Res.*, 20, 1748–1758. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.06.0303>
26. Bao, R., & Zhang, A. (2020). Does lockdown reduce air pollution? Evidence from 44 cities in northern China. *Sci. Total Environ.*, 20(731), 139052. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139052>
27. World Health Organization. (2016). Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease World Health Organization. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>

Стаття надійшла до редакції 10.06.2024 і прийнята до друку після рецензування 30.08.2024

The article was received 10.06.2024 and was accepted after revision 30.08.2024

**Адаменко Станіслав Ярославович**

аспірант кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-1678-0036>

**e-mail:** stanislav.adamenko-a101-23@nung.edu.ua

**Архипова Людмила Миколаївна**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8725-6943> **e-mail:** konsevich@ukr.net

УДК 502.175:[551.58:53.096](477)

**Andrii Mats**, PhD student

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

Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

## **STUDY OF THE FEATURE OF THE TEMPERATURE REGIME OF THE MYKOLAIV AND REGION IN THE CONTEXT OF THE ISSUE OF CLIMATE CHANGE**

**Abstract.** *Climate change is one of the most important and acute environmental problems of our time. It includes a complex of changes, such as rising ambient temperatures, changes in precipitation patterns, rising sea levels, and more frequent extreme weather events. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the average global temperature has risen by about 1.1°C since the late nineteenth century. Projections point to a possible increase of 1.5°C by the middle of this century unless significant measures are taken to reduce greenhouse gas emissions. On the basis of the above, the paper analyzes trends in changes in atmospheric air temperature on the territory of risky agriculture in the South of Ukraine in the Mykolaiv region.*

*The **purpose** of the study: to determine and substantiate the regularities of changes in the temperature regime of Mykolaiv and Mykolaiv region in the context of climate change.*

**Research results.** *The values of temperature characteristics for the year and season in Mykolaiv and Mykolaiv region during 1991–2023 are analyzed. In Mykolaiv, about 60-67 days with a negative average daily air temperature and about 32 days with a negative maximum daily air temperature are recorded. The duration of the period with a negative minimum air temperature can be an average of 93 days per year: 64 in winter, 16 in spring and 14 in autumn. At the same time, on a large territory of the Mykolaiv region, autumn is warmer than spring. The average seasonal air temperature is 10.6°C, the average maximum temperature is 15.4°C, and the average minimum temperature is 6.4°C. In the Northern Black Sea region, both maximum and minimum temperatures in autumn are higher than in spring. The dynamics of changes in average annual temperatures in the city of Mykolaiv in the period from 1980 to 2023 are analyzed. A stable linear trend towards a gradual increase in average annual temperatures has been determined. The warmest year for this observation period is 2023, the coldest are 1985 and 1987. It is determined that the rate of increase in average temperature is 0.61°C for every ten years. Maximum temperatures are increasing at a rate of 0.0884°C per year and minimum temperatures are decreasing at a rate of 0.0136°C per year. Every year, the average annual temperature increases by approximately 0.021°C. The largest number of days accompanied by heat stress (up to 90%) is observed in July – August. Thus, changes in air temperature indicate a significant change in the temperature regime of the entire climate system of the region, and the consequences of climate change may be predominantly negative and will intensify in the future.*

**Keywords:** *air temperature, temperature regime of atmospheric air, climate change.*

А.Д. Мац

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ МІСТА МИКОЛАЄВА І ОБЛАСТІ В КОНТЕКСТІ ПИТАННЯ ЗМІНИ КЛІМАТУ

**Анотація.** Зміна клімату є однією з найважливіших і найгостріших екологічних проблем сучасності. Вона охоплює комплекс змін, таких як підвищення температури атмосферного повітря, зміни режиму опадів, підвищення рівня моря і частішання екстремальних погодних явищ. Згідно з даними Міжурядової групи експертів зі змін клімату (IPCC), середня глобальна температура підвищилася приблизно на  $1,1^{\circ}\text{C}$  з кінця XIX століття. Прогнози вказують на можливе підвищення на  $1,5^{\circ}\text{C}$  вже до середини цього століття, якщо не буде вжито відповідних заходів. На підставі вищезазначеної проблеми, у роботі проаналізовано тенденції щодо змін температури атмосферного повітря на території ризикованого землеробства Півдня України Миколаївської області.

**Мета дослідження:** визначити та обґрунтувати закономірності змін температурного режиму Миколаєва і Миколаївської області в контексті питання змін клімату.

**Результати дослідження.** Проаналізовано значення температурних характеристик за рік та сезон у Миколаєві і Миколаївській області упродовж 1991–2023 років. У Миколаєві фіксується близько 60–67 днів із від'ємною середньою за добу температурою повітря і близько 32 дні з від'ємною максимальною за добу температурою повітря. Тривалість періоду з від'ємною мінімальною температурою повітря може бути у середньому 93 дні за рік: 64 – взимку, 16 – навесні і 14 – восени. Разом з тим, на значній території Миколаївської області осінь тепліша за весну. Середня за сезон температура повітря становить  $10,6^{\circ}\text{C}$ , середня максимальна –  $15,4^{\circ}\text{C}$ , а середня мінімальна –  $6,4^{\circ}\text{C}$ . У Північному Причорномор'ї як максимальна, так і мінімальна температури восени вищі, ніж навесні. Проаналізовано динаміку змін середніх річних температур у місті Миколаєві у період з 1980 по 2023 роки. Визначено стійкий лінійний тренд у напрямку поступового збільшення середніх річних температур. Найтепліший рік за даний період спостережень є 2023, найхолодніші – 1985 і 1987 роки. Визначено, що швидкість зростання середньої температури становить  $0,61^{\circ}\text{C}$  за кожні десять років. Максимальні температури зростають зі швидкістю  $0,0884^{\circ}\text{C}$  на рік, а мінімальні температури зменшуються зі швидкістю  $0,0136^{\circ}\text{C}$  на рік. Щороку середня річна температура збільшується приблизно на  $0,021^{\circ}\text{C}$ . Найбільша кількість днів, що супроводжується тепловим стресом (до 90%), спостерігається у липні – серпні. В середньому кількість спекотних днів збільшується на 1,9353 дні щороку. Отже, зміни температури повітря свідчать про суттєву зміну температурного режиму всієї кліматичної системи регіону, а наслідки кліматичних змін можуть мати переважно негативний характер і будуть посилюватись у майбутньому.

**Ключові слова:** температура атмосферного повітря, температурний режим атмосферного повітря, зміни клімату.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.59-71>

## Вступ

Упродовж ХХ століття, а також у першій чверті ХХІ століття мають місце суттєві зміни температурного режиму. За даними Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату [11–13], спостерігаються аномально високі температури у багатьох регіонах планети. Так, перші два десятиліття ХХІ століття на  $0,99^{\circ}\text{C}$  є теплішими за середню температуру доіндустріального періоду (1850–1900 роки), а упродовж 2011–2023 років – на  $1,09^{\circ}$ . Спостерігається аномалія середніх значень глобальної температури упродовж 2013–2023 років, а саме –  $1,14$  [ $1,02$  до  $1,27$ ] $^{\circ}\text{C}$ , що свідчить про продовження періоду потепління [8]. Такі аномально високі температури на планеті спостерігались 125 000 років тому, коли глобальна температура була на  $0,5$ – $1,5^{\circ}\text{C}$  вищою за температуру, порівняно з доіндустріальним періодом. Цей час відомий як Емський міжльодовиковий період, коли зміни у кліматі призвели до підвищення рівня моря та більш теплих умов на значній частині Землі.

Сучасні зміни клімату, на думку багатьох дослідників, викликані антропогенними чинниками, демонструють схожі тенденції підвищення температури. Починаючи з 1970 року, глобальна температура була найвищою за останні 2000 років, а останнє десятиріччя є найтеплішим за 6500 років. До того, останнє десятиліття дійсно було найтеплішим за останні 6500 років. Це підкреслює серйозність сучасних змін клімату та необхідність вжиття заходів для зменшення викидів парникових газів і уповільнення глобального потепління [11].

Відомо, що температурний режим регіону залежить від географічної широти, яка, у власну чергу, визначає значення сонячної радіації, особливості підстильної поверхні, а також специфіку атмосферної циркуляції, на що значною мірою впливає близька відстань від Чорного моря. Температурний режим атмосферного повітря також залежить від змін клімату, тобто довготривалих тенденцій у зміні температури, що викликані природними та антропогенними чинниками, а також від впливу людської діяльності, а саме: урбанізації, промислових викидів, змін в землекористуванні.

Зміна температури повітря свідчить про суттєву зміну температурного режиму всієї кліматичної системи планети. На думку учених, наслідки кліматичних змін мають переважно негативний характер і, за прогнозами, будуть посилюватись у майбутньому.

В Україні метеорологічні спостереження проводяться з 1881 року. Упродовж останніх десятиліть в Україні також визначено суттєві зміни кліматичної системи, індикатором яких є температурний режим атмосферного повітря [6; 8].

У дослідженні [7] подано аналіз змін річної температури в Україні, починаючи з 1901 року. Обґрунтовано тезу, що стійкість сучасної маловодної фази річки Південний Буг викликана стійким підвищенням річної температури в Україні, яке спостерігається з 2000 року по теперішній час.

Вважаємо за необхідне акцентувати увагу на той факт, що упродовж 1991–2024 років спостерігались найвищі темпи зміни середньої за рік температури атмосферного повітря, порівняно з 1961 роком. Вони майже втричі перевищували темпи зміни середньої за рік глобальної температури ( $0,21^{\circ}\text{C}/10$  років) у цей період. Як наслідок, за оцінкою NOAA, Україна потрапила до регіонів нашої планети, за винятком полярних широт, де зростання температури відбувалось найвищими темпами.

За даними аналізу Copernicus Climate Change Service, глобальна середня температура повітря на поверхні у квітні 2024 року була вищою, ніж у будь-якому попередньому квітні в наборі даних повторного аналізу, починаючи з 1940 року (рис. 1) [8].

Квітень 2024 року є одинадцятим місяцем поспіль, який є найтеплішим за відповідний місяць року. Визначено, що квітень і липень 2024 року були на 1,58°C теплішими, ніж середнє значення для доіндустріального базового періоду (1850–1900). Так, наприклад, глобальна приземна температура повітря в квітні 2024 року становила 15,03°C, що на 0,67°C вище середнього значення для квітня 1991–2023 рр. і на 0,14°C вище попереднього максимуму, встановленого в квітні 2016 року. Це місяць, у якому встановлюються температурні рекорди для відповідного періоду. Загалом, у всьому світі період упродовж 12 місяців (з травня 2023 року по квітень 2024 року) був теплішим, ніж будь-який попередній 12-місячний період, на 0,73°C вище середнього за 1991–2023 рр. і на 1,61°C вище середнього доіндустріального періоду [8].

Отже, відкриті дані моніторингових спостережень Copernicus Climate Change Service показують, що рекорди глобальних температур спостерігаються упродовж останніх місяців 2023 і 2024 років в різних регіонах Світового океану. 21 липня 2024 року є найжаркішим днем за історію спостережень. Середня температура на планеті в цей день склала 17,09°C. Це найвища температура, яку було зафіксовано з 1940 року. Попередній рекорд було встановлено у 2023 році, і він склав 17,08°C [12].

**Мета дослідження:** визначити та обґрунтувати закономірності змін температурного режиму Миколаєва і Миколаївської області в контексті питання зміни клімату.

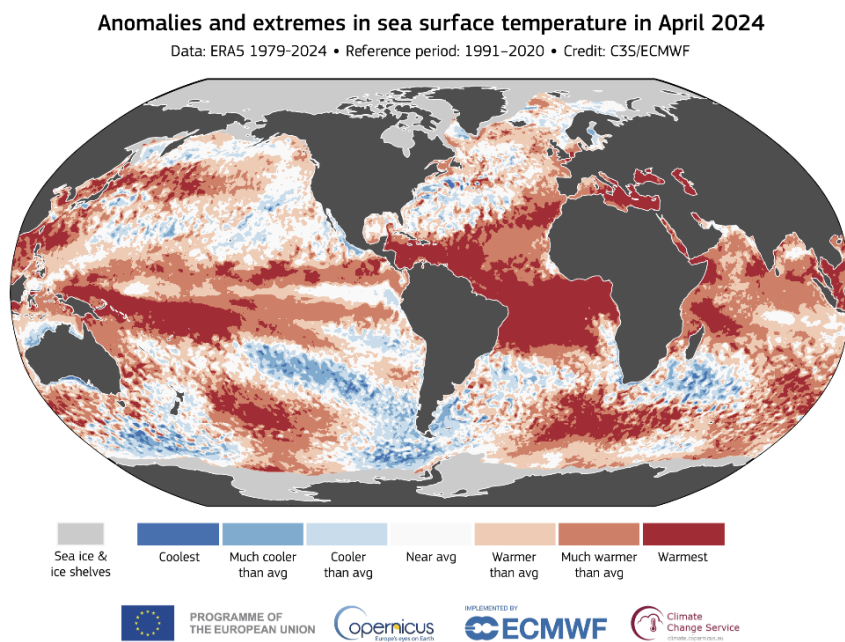


Рис. 1. Аномальні температури морської води в квітні 2024 року за даними Copernicus Climate Change Service [8]

**Матеріали та методи.** З метою оцінювання параметрів атмосферного повітря було використано бази даних стратегічних та програмних документів, а саме: екологічні паспорти Миколаївської області упродовж 2005–2023 років; регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища Миколаївської області упродовж 2005–2023 років тощо.

Під час дослідження було використано методи: збір та попередня обробка даних; побудова графіків із додаванням ліній тренду для візуалізації загальних тенденцій за допомогою лінійної регресії. Регресійний аналіз для визначення статистичної значущості. Визначення екстремальних значень, а саме років з найвищою та найнижчою кількістю спекотних днів. Аналіз аномальних років та можливих причин цих аномалій, а саме: кліматичних явищ, антропогенних чинників. Для обробки та аналізу даних було використано статистичні програми Excel.

## **Результати дослідження**

Температурний режим атмосферного повітря – це сукупність характеристик температури повітря в певному регіоні або місцевості упродовж певного періоду часу. Він охоплює середні, максимальні та мінімальні значення температури, а також їх сезонні та добові коливання. Температурний режим є одним з основних показників клімату регіону і впливає на екосистеми, сільське господарство, здоров'я людей та економічну діяльність.

Основними характеристиками температури атмосферного повітря є середньомісячні, середньосезонні показники, що відображають розподіл температури упродовж року. Середньомісячна температура – показник середньої температури за певний місяць, що дозволяє зрозуміти температурні тенденції впродовж кожного місяця року. Середньосезонна температура – показник середньої температури за певний сезон (зима, весна, літо, осінь), що відображає більш тривалі тенденції температурних змін протягом року. Ці показники є важливими для аналізу кліматичних змін, прогнозування погоди, сільського господарства та багатьох інших галузей. Вони допомагають зрозуміти розподіл температури упродовж року і виявити довгострокові тенденції кліматичних змін.

Відзначимо, що досліджуваний регіон належить до помірнього клімату, який має такі особливості:

- чітко виражена сезонність через виділення чотирьох пор року – зима, весна, літо та осінь, кожна з яких має свої характерні температурні та погодні умови;

- помірні температури, які не досягають екстремальних значень. Зими можуть бути холодними, але не надто суворими, а літа – теплими, але не надто спекотними;

- різноманітність опадів може бути різною залежно від географічного розташування, але загалом помірний клімат характеризується достатньою кількістю опадів, які розподіляються протягом року. Оподи можуть бути у вигляді дощу, снігу, туману тощо;

- м'які перехідні сезони через те, що весна і осінь у помірному кліматі зазвичай характеризуються помірними температурами і поступовим переходом від холодної зими до теплого літа і навпаки;



- спостерігаються значні зміни у тривалості дня упродовж року. Влітку дні довгі, а ночі короткі, тоді як взимку – навпаки;
- різноманіття ландшафтів може включати різні ландшафти, такі як ліси, степи, гори та узбережжя, що створює різноманітні екосистеми.

Головною ж особливістю помірного клімату є наявність чотирьох сезонів: двох основних, зима та літо, і двох проміжних – весна та осінь. Така особливість клімату характерна також для Миколаєва і області (табл. 1).

Спостереження за погодою та кліматом у місті проводить метеорологічна станція, розташована у Миколаєві. Миколаїв знаходиться у степовій агрокліматичній зоні України, у басейні нижніх течій річок Південний Буг і Інгул [6].

Таблиця 1. Значення температурних характеристик за рік та сезон у Миколаєві і Миколаївській області упродовж 1991–2023 років

Показник	Сезон, рік	Миколаїв	Миколаївська область
Середня температура, °С	Зима	-0,9	-1,1
	Весна	10,4	10,3
	Літо	22,7	22,3
	Осінь	10,9	10,6
	Рік	10,1	10,5
Максимальна середня температура, °С	Зима	2,2	2,0
	Весна	15,7	15,9
	Літо	29,0	28,6
	Осінь	15,0	15,5
	Рік	15,7	15,4
Мінімальна середня температура, °С	Зима	-3,7	-3,9
	Весна	5,6	5,3
	Літо	16,9	16,3
	Осінь	6,8	6,4
	Рік	6,4	6,0

За багаторічними даними метеорологічних спостережень, визначено, що упродовж 1991–2023 рр. клімат міста належав до помірного континентального, посушливого. Так, у Миколаєві фіксується близько 60–67 днів із від’ємною середньою за добу температурою повітря, яка є характерною ознакою зимового періоду, близько 32 дні з від’ємною максимальною за добу температурою повітря. Тривалість періоду з від’ємною мінімальною температурою повітря може бути втричі більшою – у середньому 93 дні за рік: 64 – взимку, 16 – навесні і 14 – восени.

Для оцінки відчутної температури (або «реальної» температури), яку відчуває людина, використовується Індекс вітрового охолодження Сайпла та Пассела (Siple-Passel Wind Chill Index) [9]. Цей індекс враховує комбінований ефект температури повітря та швидкості вітру, щоб визначити, наскільки холодніше відчувається температура через вітер.

Індекс вітрового охолодження у ккал/м<sup>2</sup>/год використовується для оцінки рівня тепловтрат тіла за умов холодної погоди. Чим вищий індекс (визначається за формулою 1), тим швидше людина втрачає тепло і тим холодніше відчувається температура:

$$WCI=(10V-V+10.5)\times(33-T_a), \quad (1)$$

де WCI – індекс вітрового охолодження в ккал/м<sup>2</sup>/год,  
 $T_a$  – температура повітря в градусах Цельсія,  
 $v$  – швидкість вітру в метрах за секунду.

Цей індекс є важливим інструментом для розуміння, як холод і вітер впливають на відчуття температури і тепловтрати, забезпечуючи необхідну інформацію для запобігання небезпечним для здоров'я ситуаціям. Визначено значення індексу вітрового охолодження Сайпла та Пассела, які доводять, що величина втрат тепла людським організмом на території Миколаївської області коливається в межах 850–900 ккал/м<sup>2</sup> год і загалом збігається із дослідженнями [1], відповідає категорії «холодно» і належить до помірною ризику щодо обмороження.

Температурний режим з лютого починає змінюватись. Так, спостерігається збільшення притоку сонячної радіації, що призводить до інтенсивного зростання температури повітря, тому березень тепліший за лютий практично на 5,1°C, а квітень за березень – на 7,0°C.

Теплий період у Миколаївській області триває близько 300 днів. У травні переважають літні температури, а середня місячна температура становить близько 17,01°C, а середня максимальна – 23,6°C.

Отже, у Миколаївській області весна досить тепла, про що свідчить середня за сезон температура повітря 10,3°C (табл. 1), що, загалом, вище за температуру вегетаційного періоду. Так, навесні 2024 року цвітіння багатьох рослин по Миколаївській області почалось на три тижні раніше середнього терміну. Тоді, як вважається, що середньою датою початку активної вегетації у Миколаївській області є середина квітня, а закінчення вегетаційного періоду – 15 жовтня. Період активної вегетації триває близько 187 днів.

Середня літня температура – +22,3°C (табл. 1). Найвища температура спостерігається переважно (58%) у серпні, середня температура якого становить +24,3°C, середня максимальна – +29,6°C, а середня мінімальна – +17,2°C. Значно рідше (43%) найвища температура буває у липні.

За кількістю опадів та температурними умовами північна частина області належить до зони недостатнього зволоження, центральна і південна – до посушливої. Середня за рік температура повітря в області становить +10,5°C, а річна амплітуда температури (різниця між середньою температурою найтеплішого і найхолоднішого місяця) – +25,4°C. За рік випадає у середньому 470 мм опадів. Їхня річна кількість змінюється від 407 мм на півдні (Очаків) до 553 мм на півночі (Первомайськ).

Аналіз зимових температур засвідчив, що середня температура зими становить близько -1,01°C і має діапазон коливань від -0,27°C до -1,71°C. Визначено, що на півдні Миколаївської області середня температура нижче 0°C спостерігається лише у січні і лютому. Найхолодніший місяць Миколаївської області – січень. Середній температурний режим січня –2,02°C, проте середня мінімальна – -4,75°C, а середня максимальна – +0,91°C.

На значній території Миколаївської області осінь тепліша за весну, про що свідчать дані табл. 1. Так, середня за сезон температура повітря становить  $10,6^{\circ}\text{C}$ , середня максимальна –  $15,4^{\circ}\text{C}$ , а середня мінімальна –  $6,4^{\circ}\text{C}$ . У Північному Причорномор'ї як максимальна, так і мінімальна температури восени вищі, ніж навесні.

Проаналізовано динаміку змін середніх річних температур у м. Миколаїв у період з 1980 по 2023 роки за даними спостережень авіаметеорологічної станції міста. Так, графік рис. 2 свідчить про наявність стійкого лінійного тренду у напрямку поступового збільшення середніх річних температур. Найтепліший рік за даний період спостережень є 2023, найхолодніші – 1985 і 1987 роки. Важливо відмітити, що швидкість зростання середньої температури становить  $0,61^{\circ}\text{C}$  за кожні десять років.

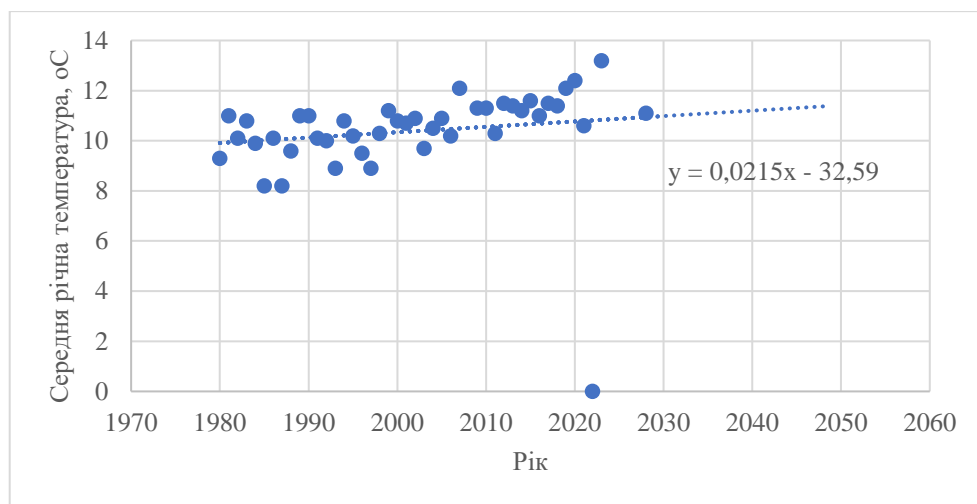


Рис. 2. Динаміка зміни середньої річної температури з 1980 по 2023 роки

Рівняння тренду  $y = 0,0215x - 32,59$  означає, що щороку середня річна температура збільшується приблизно на  $0,021^{\circ}\text{C}$ . Константа ( $-32,59$ ) має значення у контексті конкретного діапазону років. З рис. 2. видно, що є певні коливання температури навколо лінії тренду, що є звичайним для кліматичних даних. Якщо продовжити цей тренд, можна передбачити, що середня річна температура продовжить зростати і в майбутньому. На основі лінії тренду у 2050 році середня річна температура може становити приблизно:  $0,0215 \times 2050 - 32,59 = 10,7175 - 32,59 = +13,68^{\circ}\text{C}$ .

Отже, графік рис. 2 демонструє довгострокове зростання середньої річної температури, що може бути ознакою глобального потепління або інших кліматичних змін. Це важливий показник для екологічних досліджень та планування заходів з адаптації до зміни клімату.

На графіку рис. 3. зображено річні максимальні та мінімальні температури повітря з 1970 по 2023 роки. Зеленими точками відмічені максимальні температури, а синіми – мінімальні. Трендові лінії показують тенденції змін для обох температурних рядів. Згідно з трендовими лініями, максимальні температури зростають зі швидкістю  $0,0884^{\circ}\text{C}$  на рік; мінімальні температури зменшуються зі швидкістю  $0,0136^{\circ}\text{C}$  на рік. Обидва тренди вказують на зміну

температурних екстремумів з часом, що може бути пов'язано з глобальними кліматичними змінами. Також визначено, що у Миколаївській області упродовж 1991–2023 років не зафіксовано жодного випадку, коли б відмічалась найвища температура у червні. Аналізуючи тенденції щодо змін максимальних річних температур, що подано на рис. 3, можна відмітити також поступову стійку залежність до збільшення максимальних річних температур.

Лінія тренду щодо мінімальних температур засвідчує сталість. Коефіцієнт кореляції дорівнює 0,7 і є позитивним, що вказує на те, що коли одна змінна зростає, інша також має тенденцію зростати. Коефіцієнт кореляції 0,7 свідчить про сильний зв'язок між змінними, але не абсолютний. Це означає, що змінні мають тенденцію змінюватися разом, але з деяким розкидом. Мова йде про кореляцію між роком та середньою температурою.

Проте, визначена кореляція не означає причинно-наслідковий зв'язок, тобто кореляція 0,7 вказує на лінійний зв'язок, але не враховує нелінійних зв'язків.

Температурний максимум на території міста упродовж 1980–2023 років зафіксовано у 1998 році (+40,1°C); температурний мінімум – у 2006 році (–25,9°C).

Разом з тим, визначено, що по області упродовж періоду з 1991 по 2023 роки лютий у 37,0% років був холоднішим за січень. Упродовж зимового періоду в Миколаївській області спостерігається до 10 днів з мінімальною температурою повітря нижче –10,0°C, з них – до 3 днів із сильними морозами, коли температура повітря спостерігалась нижче –20,0°C. Динаміку зміни максимальної і мінімальної річних температур з 1980 по 2023 роки наведено на рис. 3.

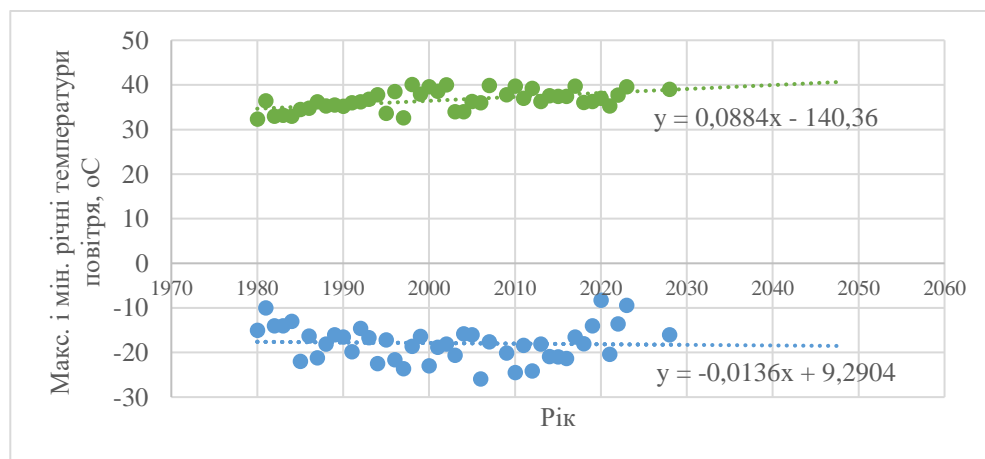


Рис. 3. Динаміка зміни максимальної і мінімальної річних температур з 1980 по 2023 роки

Зростання максимальних температур може свідчити про загальне потепління клімату. Зменшення мінімальних температур вказує на можливі більш холодні зими або ночі. Збільшення максимальних температур може призвести до підвищення частоти теплових хвиль, що може вплинути на здоров'я людей, сільське господарство та енергетичні потреби.

Використовуючи отримані рівняння трендових ліній, можна зробити прогноз щодо майбутніх максимальних та мінімальних температур.

Наприклад, для 2030 року:

Максимальна температура:  $y = 0,0884 \times 2030 - 140,36 = +39,09$ .

Мінімальна температура:  $y = -0,0136 \times 2030 + 9,2904 = -18,32$ .

Упродовж досліджуваного періоду в області спостерігалось близько 98 днів із спекотною погодою, коли максимальна температура повітря перевищує  $25,0^{\circ}\text{C}$ . Температурні умови, за яких мінімальна температура повітря перевищує  $20,0^{\circ}\text{C}$ , характерні для тропічних широт («тропічні ночі»), що є характерним для Миколаївської області. У середньому за рік спостерігається близько 20 тропічних ночей. Такі екстремальні температурні умови найбільшу повторюваність мають упродовж липня – серпня, що викликає тепловий стрес та теплове навантаження на живі організми. До того, збільшенню цього навантаження сприяє зростання відносної вологості, зменшення швидкості вітру, а також збільшення притоку сонячної радіації.

Відомо, що за однакових температур, вологості повітря та швидкості вітру теплове навантаження на організм людини буде більшим при безхмарній погоді, порівняно з такими ж метеорологічними умовами за похмурої погоди. Найбільша кількість днів, що супроводжується тепловим стресом (до 90%), спостерігається у липні – серпні.

Вважаємо за необхідне зазначити, що важливою характеристикою температурного режиму є відхилення щоденних значень мінімальної та максимальної температури від їхніх середніх багаторічних значень. Такі стрибки температурного режиму обумовлюють інтенсивність та тривалість періодів потеплінь і похолодань, що створюють певні екологічні ризики для водних ресурсів, які є фокусом нашої уваги під час подальшого дослідження.

Значення 5 перцентилів мінімальної температури повітря характеризують дуже сильні похолодання. Влітку при дуже сильному похолоданні у Миколаївській області можуть спостерігатись такі ж температури повітря, як і взимку, при дуже сильному потеплінні. Визначено, що за сезон триматиметься до 5 днів з такими екстремальними температурами.

Екстремальними є потепління, за яких максимальна за добу температура повітря більше 95 перцентилів її середніх багаторічних значень за цей день, та похолодання, при яких мінімальна за добу температура повітря нижче 5 перцентилів для цього дня. Такі хвилі тепла спостерігаються у літній період, становлять у середньому за сезон  $35,6^{\circ}\text{C}$  і характеризують дуже сильну спеку в регіоні.

Разом з тим, упродовж зимового періоду мають місце від 3-х днів з дуже високою температурою повітря, коли її максимальні значення перевищують величину 95%, а середнє максимальне перевищення становить  $2,6^{\circ}\text{C}$ . Сильне потепління навесні спостерігається частіше, ніж восени (4,08 та 3,06 відповідно). У середньому, у Миколаївській області спостерігається близько 15 днів з дуже високою для даного сезону максимальною температурою повітря. Динаміку зміни кількості спекотних днів ( $T_{\text{макс}} \geq 25^{\circ}\text{C}$ ) з 1981 по 2023 роки подано на рис. 4, з якого простежується стійке поступове зростання кількості спекотних днів щороку. Коефіцієнт нахилу 1,9353 показує, що в середньому кількість спекотних днів збільшується на 1,9353 дні щороку. Перехоплення 226,18 вказує на початкове значення кількості спекотних днів у році, коли  $x = 0$ . Найвища кількість спекотних днів спостерігається ближче до 2024 року, що підтверджує тренд до підвищення температур.

Отже, аналіз свідчить про стабільне збільшення кількості днів з температурою вище 25°C упродовж досліджуваного періоду. Це може бути результатом глобального потепління та змін клімату. Проте, в окремі роки кількість спекотних днів може бути нижчою або вищою за трендові значення, що свідчить про природні коливання або можливий вплив інших кліматичних чинників. Загалом, графік демонструє явну тенденцію до збільшення кількості спекотних днів, що є важливим показником змін клімату в регіоні.

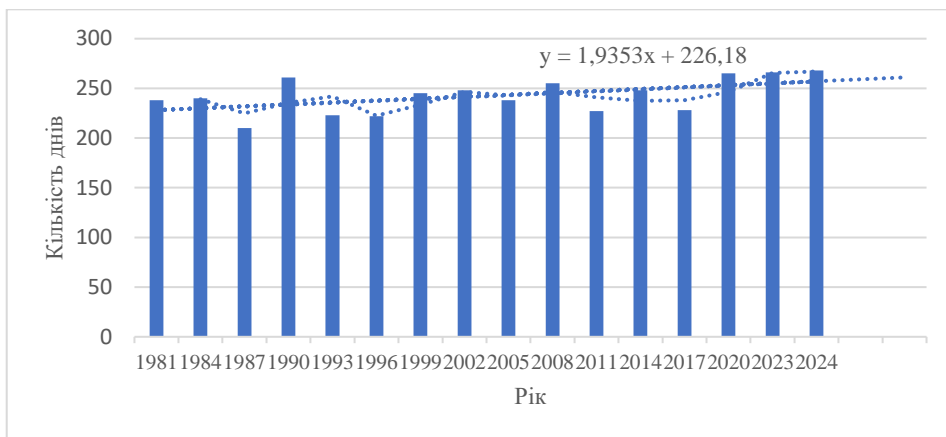


Рис. 4. Динаміка зміни кількості спекотних днів ( $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ ) з 1981 по 2023 роки

## Висновки

Проаналізовано значення температурних характеристик за рік та сезон у Миколаєві і Миколаївській області упродовж 1991–2023 років. У Миколаєві фіксується близько 60–67 днів із від’ємною середньою за добу температурою повітря і близько 32 дні з від’ємною максимальною за добу температурою повітря. Тривалість періоду з від’ємною мінімальною температурою повітря може бути у середньому 93 дні за рік: 64 – взимку, 16 – навесні і 14 – восени. Разом з тим, на значній території Миколаївської області осінь тепліша за весну. Середня за сезон температура повітря становить 10,6°C, середня максимальна – 15,4°C, а середня мінімальна – 6,4°C. У Північному Причорномор’ї як максимальна, так і мінімальна температури восени вищі, ніж навесні.

Проаналізовано динаміку змін середніх річних температур у місті Миколаєві у період з 1980 по 2023 роки. Визначено стійкий лінійний тренд у напрямку поступового збільшення середніх річних температур. Найтепліший рік за даний період спостережень є 2023, найхолодніші – 1985 і 1987 роки.

Визначено, що швидкість зростання середньої температури становить 0,61°C за кожні десять років. Максимальні температури зростають зі швидкістю 0,0884°C на рік, а мінімальні температури зменшуються зі швидкістю 0,0136°C на рік. Найбільша кількість днів, що супроводжується тепловим стресом (до 90%), спостерігається у липні – серпні. В середньому кількість спекотних днів збільшується на 1,9353 дні щороку.

Отже, зміни температури повітря свідчать про суттєву зміну температурного режиму всієї кліматичної системи регіону, а наслідки кліматичних змін можуть мати переважно негативний характер і будуть посилюватись у майбутньому.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Малицька Л.В. Дискомфорт погодних умов зимового періоду в Україні. Український гідрометеорологічний журнал. 2017, 20, С. 26–36.
2. Мітрянцова О.П., Смирнов В.М., Марійчук Р.Т., Чвир В.А. Європейські зелені виміри: навч. посібник / за редакцією проф. Олени Мітрянцової. Миколаїв : ЧНУ імені Петра Могили, 2024. 471 с.
3. Основні засади (стратегія) державної екологічної політики України на період до 2030 року (затв. Законом України від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>. (дата звернення 20.07.2024).
4. Регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-seredovyssha-v-ukrayini/> (дата звернення 28.07.2024).
5. Туз Р.В. Глобальні зміни клімату та їх вплив на стан водних ресурсів Миколаївської області. Збережемо для нащадків : матеріали XV Миколаївських міських екологічних читань, м. Миколаїв, 30 листопада 2022 р., Управління екології департаменту ЖКГ Миколаївської міської ради, Миколаївський міський центр екологічної інформації та культури [та ін.]. Миколаїв, 2023, С. 88–91.
6. Український гідрометеорологічний центр. URL: <https://www.meteo.gov.ua/> (дата звернення 28.07.2024).
7. Шевченко О. та ін. Оцінка вразливості до зміни клімату: Україна. Київ, 2014. 74 с. URL: [https://necu.org.ua/wp-content/uploads/ukraine\\_cc\\_vulnerability.pdf](https://necu.org.ua/wp-content/uploads/ukraine_cc_vulnerability.pdf) (дата звернення: 10.07.2024).
8. April 2024 – 11th consecutive warmest month globally. URL: <http://surl.li/tsbdm> (date of access 16.05.2024).
9. Siple P.A., Passel C.F. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proceedings of the American Philosophical Society*. 1945, 89 (1), P. 177–199.
10. WMO Provisional State of the Global Climate 2024, WMO, 2024. – URL: [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=22156#.Y4csiHbP02z](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=22156#.Y4csiHbP02z) (дата звернення 29.12.2024).
11. IPCC WGI Interactive Atlas: Regional information (Advanced). URL: <http://surl.li/rfvj> (date of access 18.03.2024).
12. IPCC Glossary. URL: <https://www.ipcc.ch/apps/glossary/> (date of access 18.03.2024).
13. IPCC, 2021: Climate Change 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (дата звернення 19.04.2024).

*Стаття надійшла до редакції 24.07.2024 і прийнята до друку після рецензування 05.09.2024*

## REFERENCES

1. Malytska, L.V. (2017). The discomfort of the weather conditions of the winter period in Ukraine. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 20, 26–36 [in Ukrainian].
2. Mitryasova, O.P., Smirnov, V.M., Mariychuk, R.T., & Chvyr, V.A. (2024). European green dimensions. (O.P. Mitryasova, Ed.). Mykolaiv: Petro Mohyla National University [in Ukrainian].
3. Basic principles (strategy) of the state environmental policy of Ukraine for the period until 2030 (approved by the Law of Ukraine dated February 28, 2019 No. 2697-VIII). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> [in Ukrainian].
4. Regional reports on the state of the natural environment in Ukraine. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-seredovyssha-v-ukrayini/> [in Ukrainian].

5. Tuz, R.V. (2022). Global climate changes and their impact on the state of water resources of the Mykolaiv region. In *Let's save for posterity: materials of the XV Mykolaiv City Ecological Readings, Mykolaiv, November 30, 2022* (pp. 88–91) [in Ukrainian].
6. Ukrainian hydrometeorological center. Retrieved from <https://www.meteo.gov.ua/> [in Ukrainian].
7. Shevchenko, O. et al. (2014). Climate change vulnerability assessment: Ukraine. Kyiv. Retrieved from [https://necu.org.ua/wp-content/uploads/ukraine\\_cc\\_vulnerability.pdf](https://necu.org.ua/wp-content/uploads/ukraine_cc_vulnerability.pdf) [in Ukrainian].
8. April 2024 – 11th consecutive warmest month globally. Retrieved from <http://surl.li/tsbdm>
9. Siple, P.A., & Passel, C.F. (1945). Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. In *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89 (1), 177–199.
10. WMO Provisional State of the Global Climate (2024). Retrieved from [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=22156#.Y4csiHbP02z](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=22156#.Y4csiHbP02z)
11. IPCC WGI Interactive Atlas: Regional information (Advanced). Retrieved from <http://surl.li/rfvj>
12. IPCC Glossary. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/apps/glossary/>
13. IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

*The article was received 24.07.2024 and was accepted after revision 05.09.2024*

**Мац Андрій Дмитрович**

аспірант кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили

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

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



## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

UDK 330.46:658.012

**Vitaliy Tsopa**<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4811-3712> **e-mail:** dr.tsopav@gmail.com

**Olena Yavorska**<sup>2</sup>, Doctor of Technical Science, Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5516-5310> **e-mail:** elenayavorska80@gmail.com

**Olena Borysovska**<sup>2</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7309-0236> **e-mail:** borysovska.o.o@nmu.one

**Lydia Cheberyachko**<sup>2</sup>, postgraduate  
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-2685-7809> **e-mail:** cheberiachko.lm@nmu.one

**Tetiana Nehrii**<sup>3</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4239-3178> **e-mail:** tetiana.nehrii@gmail.com

<sup>1</sup>International Management Institute, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>3</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

### THE PROCESS OF DANGEROUS EVENT MANAGEMENT TAKING INTO ACCOUNT ECONOMIC, ENVIRONMENTAL AND OCCUPATIONAL LOSSES

**Abstract.** *Aim of the research* is in risk management process development of a dangerous event taking into account economic, environmental and professional losses.

**Materials and methods.** *To develop the process of risks management from various dangers through the integration of their losses (economic, environmental, life and health of employees), we take the most common model "bow tie", which allows to establish a cause and effect relationship between danger – a dangerous event and the severity of the consequences.*

**Results.** *As a result of the research, it was found that each hazard must be considered based on three different types of damage. This makes it possible to implement another mechanism for identifying the most significant dangerous factors that lead to significant general economic losses. In the case of risk acceptability from each individual dangerous factor, there is an additional opportunity to analyze them based on the relationship between financial activity, economic and professional losses. The second consists in determining the limits of the acceptability of risks, which are formed not only based on the total acceptable economic losses, but also taking into account the stability of the enterprise's work. This implies the need to actively invest in new technologies based on short-term and long-term perspectives. The main types of dangers are defined in the risk register, which is developed by the organization to determine the integration of dangers consisting of*

*natural, technogenic, environmental, occupational and economic groups of dangers and dangerous factors. The authors develop the model and algorithm of risk management based on the combination of different consequences of dangers in economic, environmental character, life loss and health.*

**Scientific relevance.** *The article determines the relationship between the probability of a dangerous event and the severity of different types of consequences – economic, environmental and occupational dangers through the analysis of Euler-Venn diagrams.*

**Practical relevance.** *The authors develop the basic principles of risk management of different types of losses: economic, environmental ones, loss of life and health of employees.*

**Key words:** *Risk, occupational dangers, economic risk, environmental risk, occupational risk.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.72-87>

## Introduction

Integrated Management System (IMS) is defined as a set of interrelated processes that use a single fund of human resources, information, materials, infrastructure and financial resources to achieve the goals to meet various stakeholders [1]. The basis of such a system is the risk management process, which allows to identify the dangers and evaluate their risks, which, in turn, lead to the consequences of losses: economic, environmental and occupational (human health) losses.

As a result, it is possible to substantiate and provide protective and preventative measures to ensure the stability of the organization in changing conditions [2]. That is, the purpose of risk management is to predict the development of negative events under the influence of various types of devastating dangers and dangerous factors and to find measures to reduce risks – economic, environmental and occupational ones. This fact shows the necessity in creation of risk management process in an organization as the measures to find constructive solutions to effective control under the economic, environmental and occupational risks in organization management systems [3].

Creating an effective organization management is needed, first of all, to reduce losses from various hazards and dangerous events, increase profits, identify and attract new consumers, strengthen positions in the market, train staff, reach safety of technological processes, reduce wastes, and search for ways for the future business processes development. In this case, the integration of management systems, as we can see, is a natural stage of growth, which creates new opportunities for organizations, also leads to the need for special management of risks from various dangers due to differences of consequences, respectively, and financial costs to reduce them. It generates a task to identify priority directions to reduce risks under conditions of limitation of financial resources.

The most common approach to providing the effectiveness of the mentioned management systems of the organization is the well-known PDCA cycle [4], which is used in most organizations to ensure the planning, resource management, implementation and measurement process, constant improvement. To maintain a unified global risk management approach, the ISO 31000 standard was developed, but the issue of inconsistency, ambiguity only increased, especially when it applies to various types of dangers and dangerous events related to economic, environmental and professional (life and health of employees) losses that require the allocation of resources to ensure sustainable development of the organization.

## Literature review

The construction of an integrated management system in organizations is a rather difficult task. Its solution can greatly simplify the management system by reducing the workflow, removing duplicated procedures, decreasing financial costs [5]. The main advantage of such systems is the increase in transparency in making decisions, determining goals, choosing technological processes, and even justifying risks assessment methods [6]. In their research [8], the authors offer to evaluate the risks into the integrated system using the advanced FMEA method (Failure Mode and Effects Analysis). For this purpose, it was developed a universal matrix for ranking different types of risk, taking into account the intensity of their manifestation, but it is still not clear how to assess the risks of various dangers.

The introduction of management systems in organizations is often based on the "blind" compliance with the requirements set by the standard, while sometimes they are not directly related to risks, which leads to a disagreement of the assessment scales, and most importantly to the real needs of organizations [9]. In this research, there are no recommendations for combining the various requirements of standards that contradict each other.

The integrated model of quality management and environmental safety is transmitted in study [10], which is based on hypothesis that the processes that have a greater risk should be adequately evaluated and described for the development of preventive measures. The authors, protesting the model in several companies, concluded the need to reduce the volume of documented information, which requires the development of a new algorithm for processing risks and measures to reduce them.

In the next study [11], the authors to successfully manage the risks, offer a system of ranking with discrepancies and threats to priority, which were determined by the strategic goals of the organization, which, in their opinion, would ensure effective management of the company. However, it is not always an assessment of the risk based on this approach, which corresponds to the reality formed due to the global change in values of partners or the state, which requires constant processing of a risk ranking system.

The analysis of scientific papers shows that most wide-spread approaches to integration of organization management systems are based on the combined two areas (quality and ecology, quality and safety) at the centre of which is the "bow tie" model [12]. There are also general approaches to combining management systems based on the requirements of well-known standards. The main purpose of building such systems is to reduce any loss in the organization. Hence there is a significant need to understand the process of risk management of various dangers.

**The aim of the research** is in development of a risk management process of a dangerous event taking into account economic, environmental and professional losses.

## Materials and methods

To develop a risk management process of a dangerous event, taking into account losses of economic, environmental character and life and health of employees, we take the most common model "bow tie", which allows to establish a cause-effect relationship between danger – a dangerous event and a dangerous event severity of consequences. Taking into account that every dangerous event can lead to the

economic, environmental loss and life and health problems of employees at the same time the loss model can be represented in the following form (Fig. 1). In this case, the level of risk is determined by the importance of each type of loss, including the influence of different groups of dangerous factors [13].

Each danger –  $j$  leads to three risks: economic, ecological and occupational ones:

$$R_j^{ek} = \sum_{i=1}^n (B_{ji} \times TH_{ji}^{ek}), \tag{1}$$

$$R_j^{el} = \sum_{i=1}^n (B_{ji} \times TH_{ji}^{el}), \tag{2}$$

$$R_j^{pr} = \sum_{i=1}^n (B_{ji} \times TH_{ji}^{pr}), \tag{3}$$

where  $R_j^{ek}; R_j^{el}; R_j^{pr}$  – the level of appropriate risk: economic, environmental and professional risk of danger  $j$  from dangerous factors  $i$ ;  $B_{ji}$  – probability of dangerous events occurrence from danger  $j$  under the influence of dangerous factors;  $TH_{ji}^{ek}; TH_{ji}^{el}; TH_{ji}^{pr}$  – the severity of the economic, environmental and loss of life and health of employees from the occurrence of a dangerous event that arose from danger  $j$  under the influence of a dangerous factor  $i$ .

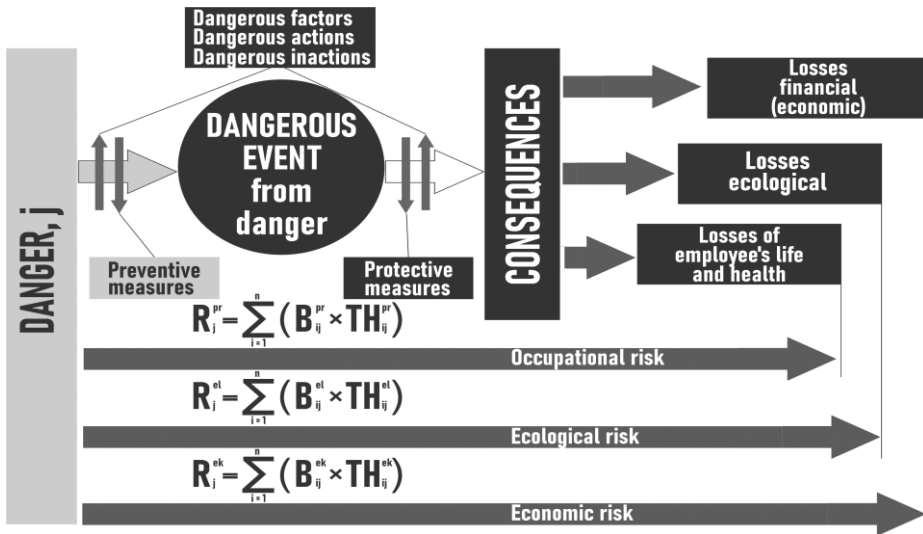


Fig. 1. Model of risk management: economic, environmental and occupational risks from danger –  $j$

The form for identifying all the dangers, taking into account the influence of dangerous factors (DF) analysis and assessment of risk from dangers for each negative consequence (DF) to determine the level of risk as acceptable or unacceptable is presented in Table 1.

The risk management algorithm with various types, which is different from well-known variants and the need to identify the severity of economic, environmental losses and losses of life and health of employees from each dangerous danger, taking into account the influence of various dangerous factors, is presented in the following steps.

Firstly, we identify risk components: dangers – dangerous event and negative consequences on economic, environmental and occupational consequences. Taking into account that most often in companies the following combination of standards – ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001 is introduced, the following danger groups can be distinguished: natural; biological and social; technogenic; ecological; professional; information; economic; terrorist; military; economic, qualitative ones. Every danger leads to a certain dangerous event, the consequences that we divide into economic, environmental and occupational.

Table 1. Form for danger identification –  $j$ , DF, analysis and risk assessment from danger –  $j$  provided that the risk level is acceptable  $A_{acc}$ /unacceptable  $In_{acc}$  for the consequences DF: loss of economic, environmental ones and life and health of employees

№ of danger	Identification				The primary analysis – determining the level for each DF and risk and assessment of risk on the loss of economic, environmental and life and health of workers			
	Danger	Dangerous event	Negative consequences from economic, environmental losses and life losses	Impact on the probability of a dangerous event and/or on the severity of the consequences of a dangerous event	The probability of an occurrence of a dangerous event from DF for every negative consequence	Severity from the occurrence of a dangerous event of each DF for each negative consequence		
						economic	ecological	occupational
$j$	Danger at the workplace	Dangerous event during the occupational activity	Violation of the normal economic and financial activities of the organization, violation of life in the ecosystem of injury, occupational diseases that are the result of dangerous event	DF 1		Sec <sub>j1</sub>	Secol <sub>j1</sub>	Socc <sub>j1</sub>
				DF 2		Sec <sub>j2</sub>	Secol <sub>j2</sub>	Socc <sub>j2</sub>
				DF 3		Sec <sub>j3</sub>	Secol <sub>j3</sub>	Socc <sub>j3</sub>
				DF 4		Sec <sub>j4</sub>	Secol <sub>j4</sub>	Socc <sub>j4</sub>
				DF 5		Sec <sub>j5</sub>	Secol <sub>j5</sub>	Socc <sub>j5</sub>
				DF 6		Sec <sub>j6</sub>	Secol <sub>j6</sub>	Socc <sub>j6</sub>
				DF 7		Sec <sub>j7</sub>	Secol <sub>j7</sub>	Socc <sub>j7</sub>
				DF 8		Sec <sub>j8</sub>	Secol <sub>j8</sub>	Socc <sub>j8</sub>
				DF 9		Sec <sub>j9</sub>	Secol <sub>j9</sub>	Socc <sub>j9</sub>
				DF 10		Sec <sub>j10</sub>	Secol <sub>j10</sub>	Socc <sub>j10</sub>
				DF 11		Sec <sub>j11</sub>	Secol <sub>j11</sub>	Socc <sub>j11</sub>
				...		...	...	...
				DF $i$		Sec <sub>ji</sub>	Secol <sub>ji</sub>	Socc <sub>ji</sub>
				...		...	...	...
				DF $n$		Sec <sub>jn</sub>	Secol <sub>jn</sub>	Socc <sub>jn</sub>
Total risk from dangers by type of loss								

Continuation of table 1

№ of danger	Identifica- tion	The primary analysis – determining the level for each DF and risk and assessment of risk on the loss of economic, environmental and life and health of workers					
	Impact on the probability of a dangerous event and/or on the severity of the consequences of a dangerous event	The level of risk from the onset of dangerous event of each DF for each negative consequence			Primary risk assessment of danger – $j$ on each DF – and for each negative consequence		
		economic	ecological	occupational	economic	ecological	occupational
$j$	DF 1	Rec <sub>j1</sub>	Recol <sub>j1</sub>	Rocc <sub>j1</sub>	Pr/NegCons	Pr/NegCons	Pr/NegCons
	DF 2	Rec <sub>j2</sub>	Recol <sub>j2</sub>	Rocc <sub>j2</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	DF 3	Rec <sub>j3</sub>	Recol <sub>j3</sub>	Rocc <sub>j3</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	DF 4	Rec <sub>j4</sub>	Recol <sub>j4</sub>	Rocc <sub>j4</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	DF 5	Rec <sub>j5</sub>	Recol <sub>j5</sub>	Rocc <sub>j5</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	DF 6	Rec <sub>j6</sub>	Recol <sub>j6</sub>	Rocc <sub>j6</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	DF 7	Rec <sub>j7</sub>	Recol <sub>j7</sub>	Rocc <sub>j7</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	DF 8	Rec <sub>j8</sub>	Recol <sub>j8</sub>	Rocc <sub>j8</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	DF 9	Rec <sub>j9</sub>	Recol <sub>j9</sub>	Rocc <sub>j9</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	DF 10	Rec <sub>j10</sub>	Recol <sub>j10</sub>	Rocc <sub>j10</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	DF 11	Rec <sub>j11</sub>	Recol <sub>j11</sub>	Rocc <sub>j11</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	...	...	...	...	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	DF $i$	Rec <sub>ji</sub>	Recol <sub>ji</sub>	Rocc <sub>ji</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
	...	...	...	...	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons
DF $n$	Rec <sub>jn</sub>	Recol <sub>jn</sub>	Rocc <sub>jn</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons	
Total risk from dangers by type of loss	$\Sigma$ Rec <sub>ji</sub>	$\Sigma$ Recol <sub>ji</sub>	$\Sigma$ Rocc <sub>ji</sub>	Pr/NCons	Pr/NCons	Pr/NCons	

For the first risk management step, it is important to establish a relationship between danger, dangerous event and consequences that affect the organization [14]. The analysis of national regulatory documents has allowed to develop an appropriate register of dangers (see Table 2), which are characterized by different losses.

Economic losses are characterized by violation of normal economic and financial activities due to the loss of the value of fixed assets of the enterprise; losses of value of circulation funds of the enterprise; lack of potential income due to the appearance of dangerous events; loss of contracts of suppliers and consumers; losses of the image of the enterprise; compensation to legal entities and individuals affected by the manifestation of dangerous events.

Table 2. Analysis of the dangers consequences of different character

№	Group (kind) of dangers	Dangerous events	Consequences		
			Economic (financial) losses	Ecological losses	Occupational losses
1	2	3	4	5	6
1.	Natural	Geological (earthquake, lava stream, rock collapse) Hydrogeological (flood, flooding, villa) Metrological (whirlwind, hurricane, storm, rain, frost, icing)	Destruction and destroying of tangible assets	Disruption of the human life system	Death, injury to employees in an organization, physical and mental exhaustion
2.	Biological and social	Epidemic (influenza, kovid, tuberculosis) Epizootia (bird flu, African plague, rabies) Epiphytone (rust of grain cereals, blight)	Financial losses	Deterioration of the state of biota, disease, death of people	The death of employees in the organization, physical and mental exhaustion
3.	Techno-genic	Industrial accidents (radioactive, chemical, biological contamination) Fire Explosions (shock wave) Transport (road, rail, air, water, etc.)	Destruction and destroying of tangible assets	Pollution of the natural environment by harmful substances that exceed the permissible concentrations in the air, water and soils	Death, injury of employees, experience of stress, physical exhaustion
4.	Ecological	Pollution (abiotic, biotic, anthropogenic)	Destruction and destroying of tangible assets, financial losses	Pollution of the natural environment by harmful substances that exceed the permissible concentrations in the air, water and soils	Death, injury of employees
5.	Occupational	Incidents, accidents, occupational diseases	Financial losses	Pollution of the natural environment by harmful substances that exceed the permissible concentrations in the air, water and soils	Death, injury of employees, experience of stress, physiological strain

Continuation of table 2

1	2	3	4	5	6
6.	Terroristic	Attacks on infrastructure, transport systems, etc.	Destruction and destroying of tangible assets	Pollution of the natural environment by harmful substances that exceed the permissible concentrations in the air, water and soils	Death, injury of employees, experience of stress, physiological strain
7.	Military	War actions	Destruction and destroying of tangible assets	Pollution of the natural environment by harmful substances that exceed the permissible concentrations in the air, water and soils	Death, injury to a large number of people, an increase in psychological stress of stress experience, physical exhaustion
8.	Informational	Leakage of commercial information from the organization	Loss of financial profit	Reduction of financing and environmental safety protective measures	Stress experience of employees
9.	Economic	Organizational errors Reduced demand Changes of currency Licenses loss Credit debt Bankruptcy	Loss of financial profit	Reduction of financing and environmental safety protective measures	Reduction of funding for safety and protective measures, experience of stress by employees
10.	Qualitative	Lack of production	Loss of financial profit	Increase of wastes	Experience of stress by employees

Environmental losses from dangers violate life in a certain territory, which is manifested in the increase in the disease and/or death of people; deterioration of biota (environment), pollution of the environment.

Occupational losses are characterized by the creation of a threat to the life and health of the staff of the organization, the experience of stress and physiological overload due to violations of production cycles, the refusal of technical means of production, which lead to dangerous situations (accidents, fires, explosions).

In the second step, there is an identification of dangerous factors (DF), dangerous actions or inaction that increase the probability of a dangerous event and the severity of the consequences. For this step, for example, we can use methods such as SWOT analysis, PEST analysis or PIMs analysis, questionnaire, observation, employee surveys, discussions and etc. As a result, we get a register of dangerous factors that are convenient to divide into several groups: human, organizational, ergonomic, technical and others. An example of such registers is given in the researches [15].

During the third step, we analyze and determine the risk of danger from the influence of all the identified dangerous factors, which are determined by formulas (1-3). That is, the level of risk from each dangerous factor is calculated by summing the risks from all dangerous external and internal factors at the workplace, taking into account dangerous actions and inaction of employees. At the same time, as it is mentioned above, three types of risk of economic, environmental and



occupational losses are calculated. An important condition for conducting this procedure is to establish the scale of the probability of a dangerous event and the severity of the consequences. If the first one can use the recommendations of the ISO 31073: 2022, which determines that probability is a measure of the possibility of occurrence, which is given by the number between 0 and 1, where 0 is inability, and 1 is absolute confidence, then with the scale of severity of consequences. Determination of the severity of the consequences of economic environmental and occupational losses should be made specific and understandable to employees of companies (Table 3).

During the fourth step, we evaluate the level of risks from economic, environmental and occupational losses, based on certain conditions of acceptability or inacceptability of their level [20, 21]. Initially, we evaluate the risks of each type of consequences separately, summing the points from the influence of all the identified dangerous factors. Then, we compare the calculated risk with a critical one (for example, for matrix 5 by 10 it is 50 points), which is established in terms of the matrix of risk assessment, taking into account the financial capabilities of the organization.

Table 3. The criteria of the scale of severity of consequences from economic, environmental and occupational losses from the occurrence of a dangerous event [16–19]

№	The severity of losses		The severity of the consequences of a dangerous event from losses		
	Name	Points	Economic	Ecological	Occupational
1	Low	1	0-100\$	Ecosystem objects in the natural state are usually oligotrophic, suitable for all kinds of residence	Injury of the employee
2	Insignificant	2	100-1000\$	Ecosystem objects are close to the natural state or poorly eutrophied, suitable for all types of residence	Light injury of the employee or group injury
3	Moderate	3	1000-10000\$	Ecosystem objects are under the influence of sources of collapse or other types of technogenic influence, suitable for residence only for strong species	Moderate injury of the employee or light group injury
4	Significant	4	10000-500000\$	Ecosystem objects are significantly contaminated in the result of harmful pollutants, objects are only suitable for those species in which less stringent requirements for the quality of components	Significant injury of the employee or significant group injury
5	Catastrophic	5	more than 500000\$	Ecosystem destruction	Death of an employee or group serious injury

In case of lack of risk from each loss, we move to the fifth step, where we determine that significant dangerous factors that have the highest rates or the probability of a dangerous event or severity of consequences. We analyze the ways of reducing their impact, using a hierarchy of preventive and protective measures.

If the levels of risk from each loss are acceptable we move to the sixth step, where we compare them with the limit of acceptability, which is set from three losses at a time. It is not possible to do the usual summation of the set critical levels of risk from each loss. Because the risks are interconnected and have some impact on each other. For example, through human activity [19]. So, most environmental problems (depletion of biodiversity, lack of fresh water, etc.), as well as dangerous situations (injury to employees, accidents, failures) are caused by people. On the other hand, the reduction of human activity can be the most effective technique, both to reduce environmental problems and to increase the size of the resource base. However, human activity is important for the economic development of organizations. Hence their relationship can be expressed due to a general economic loss from a dangerous event (Fig. 2).



Fig. 2. Relationship of general economic loss from a dangerous event and its components: economic losses from benefit decrease, environmental losses and losses of life and health of people

If we present the limits of acceptability of economic, environmental and occupational risks from the occurrence of a dangerous event, a certain set (eg monetary equivalent), according to the Euler-Venn diagram (Fig. 4), it is possible to establish a zone (1-2-3) that will provide minimal losses which on the other side allows to determine the limits of stability of the organization [22].

Hence, there are several variants (Table 4) of the risk distribution, which are determined by the intersection of sets that are illustrated in Fig. 6. So, variants A - D with Fig. 6 show that it is not possible to ensure the limit of acceptability due to the discrepancy of one of the components of costs.

Again, in the event of inacceptability of total losses from certain levels of risk, we return to the fifth step and suggest additional safety and protective measures, based on what level of losses for the organization is the most critical. Afterwards, we return to the stage of analysis and reassessment of the risk to find out the effectiveness of the offered measures or actions.

Table 4. Analysis of options for distribution of dangers risk by three types of losses (the Euler-Venn diagram)

Variant	Zone	Risk of economic (financial) losses – decreased economic benefit	Risk regarding the loss of life and health of employees	Risk regarding environmental losses
№1	1	Acceptable	Unacceptable	Unacceptable
№2	2	Unacceptable	Acceptable	Unacceptable
№3	3	Unacceptable	Unacceptable	Acceptable
№4	1-2	Acceptable	Acceptable	Unacceptable
№5	2-3	Unacceptable	Acceptable	Прийнятний
№6	3-1	Acceptable	Unacceptable	Acceptable
№7	1-2-3	Acceptable	Acceptable	Acceptable

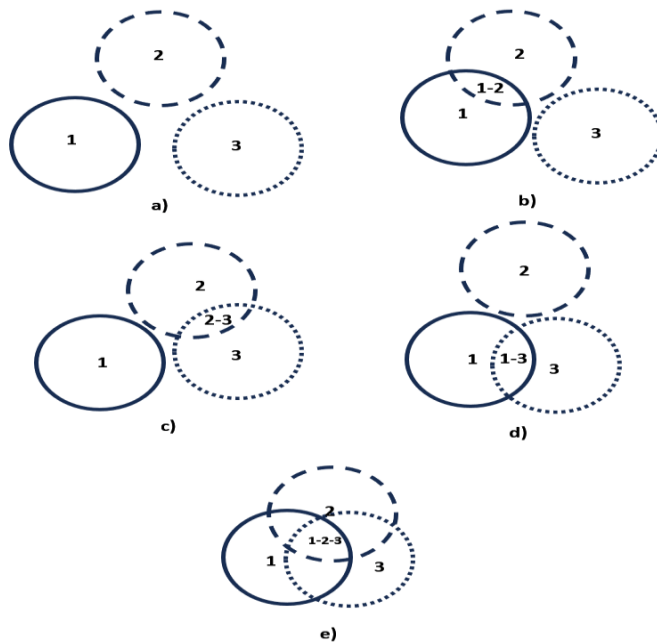


Fig. 3. Euler-Venn diagram of risk of economic (1), environmental (2), occupational (3) losses

The seventh step is documentation of risk levels where the relevant registers are created, both hazards and dangerous factors, as well as the description of the possible consequences of their manifestation. The appropriate risk maps are filled, which record the initial risk assessment data, and then, taking into account preventive and protective measures – a permanent one. An appropriate plan for periodic risks is predicted.

During the last step, we develop a risk monitoring procedure, including lines of informing, staff training and increased maturity of risk management activities (level of risk management development, which is characterized by the efficiency and effectiveness of the approaches over the results of the organization's activities).

## Discussion of research results

An important condition for the effective functioning of an organization is the ability to find interaction between the requirements of society, which is ensured by economic growth and the capabilities of the environment.

With consideration of ISO 9001: 2015, the International Standardization Organization has tried to focus on improving the processes and identification and control of risks, which will allow us to better conduct a risk management process: economic, environmental and occupational focus on these purposes, any organization determines the way to manage risks for satisfaction of stakeholders. We pay attention to the peculiarity of integration of environmental risks specified in the ISO 14001: 2015. It turns out that it requires organizations to follow the rules to ensure environmentally friendly technologies by reducing pollution and maintaining investment in sustainable projects. Hence, there is a need to support stakeholders through the developed tools to ensure the improvement of the overall corporate style on the organization development, in combination with economic and occupational dangers, which are often interconnected and even interdependent. Such dangers include inadequate waste management, uncontrolled consumption of energy and emissions of pollutants into water, air and soil, risks to improve production processes and reduce environmental risks, which is also characteristic of economic discrepancies, as dangerous factors that increase the probability of economic losses [7].

As a result of the proposed risk management process, a better consistency of actions within the organization is ensured, enhancing the synergistic effect, which is that the overall result of mutual actions is higher than the sum of individual results. It allows:

1) to increase the competitiveness of the enterprise by increasing the level of its business reputation and the quality of management of the organization;

2) to minimize the functional separation of staff in an organization that arises during the development of autonomous management systems;

3) to ensure the functioning of integrated control systems with the help of less efforts than creating several parallel systems;

4) to ensure the balance of interests of the external sides of the organization than several systems that operate in parallel;

5) to achieve greater "transparency" and control by the organization, because the number of internal and external connections in the integrated system is less than the total number of these connections in several systems;

6) to reduce the total volume of documents in several parallel systems;

7) to reduce the conflict and probability of possible contradictions between issues related to economics, ecology and security, more complete approach to the growth of profitability, more efficient use of resources, increasing the coherence of the information exchange process, preventing duplication.

Sustainable development of the organization is an important issue that will not only provide competitive advantages in the future, but also contribute to the minimization of losses through appropriate risk management processes, taking into account the economic losses from their consequences. This encourages organizations, seek the limits of stability that will balance the challenges (dangers) and the losses that the organization will incur to eliminate them. Considering that the largest economic burden of organizations is imposed by environmental standards,

there is a task in the redistribution of financing and determining the boundaries of safe activity of the organization. This is quite convenient to use here the Euler-Venn diagrams that will demonstrate how much the boundary of opportunities will be changed under different input conditions (Fig. 4).

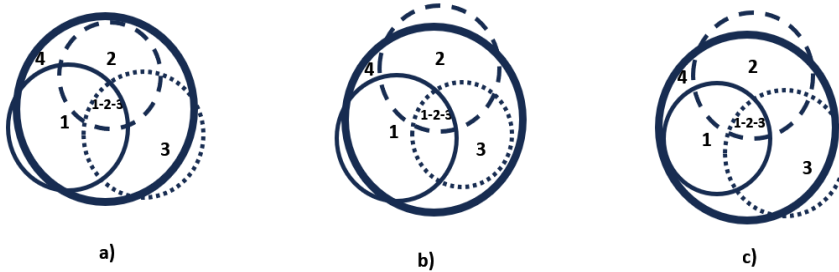


Fig. 4. Euler-Venn diagram on risk acceptance of general risk (4) from economic (1), ecological (2), occupational (3) losses: a) acceptable occupational risk of less than other acceptable risks; b) acceptable occupational risk of less than other acceptable risks; c) acceptable occupational risk of less than other acceptable risks

All kinds of sustainable development activities can be determined by the overall economic loss that allows us to set an unacceptable level of general economic risk –  $R_j$  – should be not more than or equal to the amount of unacceptable levels of risks:

$$R_j = R_j^{ek} + R_j^{el} + R_j^{pr} . \quad (4)$$

This research shows two contributions. The first one consists in the fact that every danger must be based on three different losses. This allows us to implement another mechanism to identify the most significant dangerous factors that lead to significant general economic losses. Even in the case of risk of each individual dangerous factor, there is an additional possibility of analyzing them from the condition of sustainable development, that is, on the basis of the relationship between financial activity, economic and occupational losses on the stability of the organization. The second contribution consists in determination of the limits of the risks acceptability, which are formed not only on the basis of the overall acceptable economic loss, which should not exceed the profit, but also taking into account the stability of the enterprise. This implies the need to actively invest in new technologies, based on short-term and long-term prospects.

It is important to understand that sustainable management helps organizations to perform innovative processes, reduce wastes and get an idea of possible areas of growth. Thus, sustainable development is not only an environmentally oriented strategy, but a multifunctional solution that encompasses the concern and the environment, society and effective management in public and private sectors.

## Conclusions

1. The article identifies the main dangers consisting of natural, technogenic, environmental, occupational and economic groups of dangers and dangerous factors.

2. The authors develop the model and algorithm of risk management based on a combination of different consequences of economic, environmental characters, life loss and health problems.

3. Through Euler-Venn diagram the authors determine the relationship between the probability of a dangerous event and the severity of the consequences between groups of economic, environmental and occupational risks.

## REFERENCES

1. Ispas, L., Mironeasa, C., & Silvestri, A. (2023). Risk-Based Approach in the Implementation of Integrated Management Systems: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 15, 10251. <https://doi.org/10.3390/su15131025>
2. Khalil, M.K., & Muneenam, U. (2021). Total Quality Management Practices and Corporate Green Performance: Does Organizational Culture Matter? *Sustainability*, 13, 11021. <https://doi.org/10.3390/su131911021>
3. Georgiadi, N.G. (2009). Monitoring of the State of Computer-Integrated Control Systems by Economic Development of Machine-Building Enterprises. *Regional Economy*, 1, 121-128. Available from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/regek\\_2009\\_1\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/regek_2009_1_17) [in Ukrainian].
4. Degtiareva, O. (2020). Pdca-cycle for achieving the energy controlling goals. *Problems of systemic approach in the economy*, 3(77)-1, 146-150. <https://doi.org/10.32782/2520-2200/2020-3-42> [in Ukrainian].
5. Ryazanova, N.O. (2022). Formation of a risk management system at industrial enterprises. *Academy review*, 1(56), 63-71. Available from: <http://hdl.handle.net/123456789/9589> [in Ukrainian].
6. Vulcanović, S., Delić, M., Kamberović, B., Beker, I., & Lalić, B. (2020). Integrated management systems based on risk assessment: Methodology development and case studies. *Journal Advances in Production Engineering & Management*, 15 (1), 93-106. <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.352>
7. Schutzbach, M., Kögel, A., Kiemel, S., Mieke, R., & Sauer, A. (2022). Principles of Management Systems for Positive Impact Factories. *Sustainability*, 14, 16709. <https://doi.org/10.3390/su142416709>
8. Tian, Z.-P., Wang, J.-Q., & Zhang, H.-Y. (2018). An integrated approach for failure mode and effects analysis based on fuzzy best-worst, relative entropy, and VIKOR methods. *Applied Soft Computing*, 72, 636-646. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.03.037>
9. Kolenda, N., & Dytyna, O. (2021). The essence of the integrated management system of the enterprise. *Economy and society*, 26, <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-26-53> [in Ukrainian].
10. Lebedynets, V.O., & Zhurenko, V.V. (2020). To the issue of the integration of the quality management system and the environmental management system into the general management system of the National Institute of Public Health. *Management and marketing as a part of modern economy, science, education, practice: materials of the 8th international science and practice distance Conference*, Kharkiv, March 19. 2020. (Pp. 72-74). Available from: <http://dspace.nuph.edu.ua/handle/123456789/21971> [in Ukrainian].
11. Trunova, O.V. (2012). Risk assessment of integrated production systems. *Scientific journals of the University. Series 03. Physics and mathematics in higher and secondary school*, 10, 217-227. Available from: <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/2937> [in Ukrainian].

12. Nechayeva, I., & Donchik, D. (2021). Use of bowtie tie technology in risk assessment practice. *Economy and society*, 33, <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-33-51> [in Ukrainian].
13. Sepp Neves, A.A., Pinardi, N., Martins, F., Janeiro, J., Samaras, A., Zodiatis, G., & De Dominicis, M. (2015). Towards a common oil spill risk assessment framework - Adapting ISO 31000 and addressing uncertainties. *Journal of Environmental Management*, 159, 158-168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.044>
14. Bazaluk, O., Tsopa, V., Cheberiachko, S., Deryugin, O., Radchuk, D., Borovytskyi, O., & Lozynskyi, V. (2023). Ergonomic risk management process for safety and health at work. *Frontiers in Public Health*, 11, 1253141. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1253141>
15. Taguchi, R., Tanoue, M., Yamazaki, D., & Hirabayashi, Y. (2022). Global-Scale Assessment of Economic Losses Caused by Flood-Related Business Interruption. *Water*, 14, 967. <https://doi.org/10.3390/w14060967>
16. Syrochuk, N.A. (2010). Risk as an economic category in enterprise activity. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Series: "Economic Sciences"*, 4(4), 54-61. Available from: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page\\_id=457](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/?page_id=457) [in Ukrainian].
17. Pokshevnytska, T.V. (n.d.). Criteria for environmental impact assessment. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-289-0-10> [in Ukrainian].
18. Selvinsimpson, S., & Chen, Y. (2022). Chapter 12 - Industry and environmental life-cycle assessment: background and perspective. *Environmental Sustainability and Industries Technologies for Solid Waste, Wastewater, and Air Treatment*, 275-287. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90034-8.00022-1>
19. Doregar Zavareh, R., Dana, T., Roayaei, E., Monavari, S.M., & Jozi, S.A. (2022). The Environmental Risk Assessment of Fire and Explosion in Storage Tanks of Petroleum Products. *Sustainability*, 14, 10747. <https://doi.org/10.3390/su141710747>
20. Porudieieva, T.V., Tkachenko, M.O., & Kramarenko, A.Yu. (2018). The concept of sustainable development in the region. *Pryazovskyi economic herald*, 6(11), 356-359. Available from: [http://pev.kpu.zp.ua/journals/2018/6\\_11\\_uk/65.pdf](http://pev.kpu.zp.ua/journals/2018/6_11_uk/65.pdf) [in Ukrainian].
21. Zhuchenko, A.M. (2016). The concept of sustainable development in modern economy. *Global and national economic problems*, 13, 431-434. Available from: <http://global-national.in.ua/archive/13-2016/86.pdf> [in Ukrainian].
22. Gastón de los Reyes, Markus Scholz (2019). The limits of the business case for sustainability: Don't count on 'Creating Shared Value' to extinguish corporate destruction. *Journal of Cleaner Production*, Volume 221, 785-794. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.187>

*The article was received 27.03.2024 and was accepted after revision 26.07.2024*

**В.А. Цопа, О.О. Яворська, О.А. Борисовська, Л.М. Чеберячко, Т.О. Негрій**  
**ПРОЦЕС КЕРУВАННЯ РИЗИКОМ НЕБЕЗПЕЧНОЇ ПОДІЇ З УРАХУВАННЯМ**  
**ЕКОНОМІЧНИХ, ЕКОЛОГІЧНИХ І ПРОФЕСІЙНИХ ВТРАТ**

**Анотація.** Мета роботи полягає у розробці процесу керування ризиком небезпечної події з урахуванням економічних, екологічних і професійних втрат.

**Матеріали і методи.** Для розробки процесу керування ризиками від різних небезпек через інтеграцію їх втрат (економічних, екологічних і життя та здоров'я працівників) за основу візьмемо найбільш поширену модель «краватка-метелик», яка дозволяє встановити причинно-наслідковий взаємозв'язок між безпекою – небезпечною подією і тяжкістю наслідків.

**Результати.** В результаті проведених досліджень з'ясовано, що кожену небезпеку необхідно розглядати, виходячи з трьох різних видів збитків. Це дозволяє реалізувати ще один механізм з виявлення найбільш суттєвих небезпечних чинників, які призводять до значних загальних економічних втрат. У випадку прийнятності ризику від кожного окремого небезпечного чинника з'являється додаткова можливість їх аналізу на основі взаємозв'язку між фінансовою діяльністю, економічними та

професійними втратами. Другий полягає у визначенні меж прийнятності ризиків, які формуються не тільки виходячи із загальних прийнятних економічних втрат, а й з урахуванням стабільності роботи всього підприємства. Це передбачає необхідність активно інвестувати в нові технології, виходячи від короткострокових і довгострокових перспектив.

Визначені основні види небезпек, які наведені в реєстрі ризиків, який розробляє організація для визначення інтеграції небезпек, що складається з природних, техногенних, екологічних, професійних та економічних груп небезпек і небезпечних чинників. Розроблено модель і алгоритм керування ризиками на основі поєднання різних наслідків небезпек по економічним, екологічним факторам, втрати життя та здоров'я.

**Наукова новизна.** Визначено взаємозв'язок між ймовірністю настання небезпечної події та тяжкістю різних видів наслідків – економічних, екологічних та професійних небезпек через аналіз діаграм Ейлера-Венна.

**Практична цінність.** Розроблено основні принципи керування ризиками різних з урахуванням різних видів втрат: економічних, екологічних та життя і здоров'я працівників.

**Ключові слова:** Ризик, професійні небезпеки, економічний ризик, екологічний ризик, професійний ризик.

*Стаття надійшла до редакції 27.03.2024 і прийнята до друку після рецензування 26.07.2024*

#### **Цопа Віталій Андрійович**

доктор технічних наук, професор кафедри менеджменту, Міжнародний інститут менеджменту

**Адреса робоча:** вул. Шулявська, 10/12, м. Київ, Україна, 04116

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4811-3712> **e-mail:** dr.tsopav@gmail.com

#### **Яворська Олена Олександрівна**

доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5516-5310> **e-mail:** elenayavorska80@gmail.com

#### **Борисовська Олена Олександрівна**

кандидат технічних наук, доцент, зав. кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7309-0236> **e-mail:** borysovska.o.o@nmu.one

#### **Чеберячко Лідія Миколаївна**

аспірант кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-2685-7809> **e-mail:** cheberiachko.lm@nmu.one

#### **Негрій Тетяна Олександрівна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4239-3178> **e-mail:** tetiana.nehrii@gmail.com



UDC 628.5/8 : 614.7

**Serhii Sukach**<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6834-0197> **e-mail:** [sergvs69@ukr.net](mailto:sergvs69@ukr.net)

**Olha Chenchewa**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5691-7884> **e-mail:** [chenchevaolga@gmail.com](mailto:chenchevaolga@gmail.com)

**Tetiana Kozlovskaya**<sup>2</sup>, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6106-5524> **e-mail:** [kozlovskaya5819@gmail.com](mailto:kozlovskaya5819@gmail.com)

**Yevhenii Lashko**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9691-4648> **e-mail:** [evgeny.lashko.lj@gmail.com](mailto:evgeny.lashko.lj@gmail.com)

**Dmytro Rieznik**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1258-6136> **e-mail:** [2411dimareznik@gmail.com](mailto:2411dimareznik@gmail.com)

**Kostiantyn Tkachuk**<sup>3</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5230-9980> **e-mail:** [kkttkk297@gmail.com](mailto:kkttkk297@gmail.com)

<sup>1</sup>Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

<sup>2</sup>Kremenchuk flight college of National Aviation University, Kremenchuk, Ukraine

<sup>3</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

## ENSURING THE NORMALIZATION OF THE AERO-IONIC REGIME IN PRODUCTION AREAS BY MEANS OF ULTRASONIC AIR IONIZATION

**Abstract.** *The results of studies on the normalization of the aeroionic regime in rooms under ultrasonic ionization of humidified air are presented. The increase in the concentration of negative aeroions under these conditions by the combined effect of the balloelectric effect and ultrasonic cavitation is substantiated. It has been established that when distilled water is used as a source of air ions under the action of a 10 W ultrasonic generator at a distance of 0.5 m, the concentration of negative air ions increases almost sixfold. At the same time, due to the joint effect of ultrasonic cavitation in the surface layer of water and the balloelectric effect, no generation of ozone and nitrogen oxides is caused. It is proved that with a decrease in the degree of water mineralization, the concentrations of negative and positive aeroions increase due to changes in the physicochemical properties of water and the resulting mechanochemical phenomena. The mechanism of formation of air ions in the air of industrial premises under the combined action of the balloelectric effect and ultrasound is proposed. It is substantiated that the quality of the air ionic composition of industrial premises air improves at a temperature of demineralized water of 20-25 °C and a directed air flow of 6 m/s towards the working area with the combined effect of ultrasound and balloelectric effect, which contributes to the improvement of sanitary and hygienic working conditions. The structure of an automated system for controlling the aeroionic regime of the working area of industrial premises with artificial ionization of humidified air using an aeroion generator and a ventilation system is proposed. This will allow monitoring and processing of information on technological, electrical and microclimatic parameters, adjusting, coordinating and jointly controlling the ventilation system devices and the ultrasonic generator of air ions.*

**Key words:** *aeroionic mode, balloelectric effect, ultrasonic cavitation, working area, production facility.*

С.В. Сукач<sup>1</sup>, О.О. Ченчева<sup>1</sup>, Т.Ф. Козловська<sup>2</sup>, Є.Є. Лашко<sup>1</sup>, Д.В. Рєзнік<sup>1</sup>,  
К.К. Ткачук<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

<sup>2</sup>Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, Кременчук, Україна

<sup>3</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НОРМАЛІЗАЦІЇ АЕРОІОННОГО РЕЖИМУ У ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ ШЛЯХОМ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ІОНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯ

***Анотація.** Наведено результати досліджень щодо нормалізації аероіонного режиму у приміщеннях під час ультразвукової іонізації зволоженого повітря. Обґрунтовано підвищення показників концентрації негативних аероіонів у виробничих умовах за рахунок комплексного впливу балоелектричного ефекту й ультразвукової кавітації. Встановлено, що за використання дистильованої води як джерела аероіонів у результаті дії ультразвукового генератора потужністю 10 Вт на відстані 0,5 м показники концентрації негативних аероіонів зростають практично у шість разів. Водночас, за рахунок спільного впливу балоелектричного ефекту й ультразвукової кавітації у поверхневому шарі води не спричиняється генерація озону й оксидів Нітрогену. Доведено, що зі зниженням ступеня мінералізації води показники концентрації позитивних і негативних аероіонів зростають унаслідок зміни фізико-хімічних властивостей дистильованої води та виникаючих механохімічних явищ. Запропоновано вдосконалений механізм утворення аероіонів у повітрі виробничих об'єктів під час спільної дії ультразвуку та балоелектричного ефекту. Обґрунтовано, що суттєве покращення якості аероіонного складу повітря у виробничих умовах відбувається за температури демінералізованої води 20–25 °С та направленою повітряною потоку швидкістю 6 м/с в бік робочої зони під час спільної дії балоелектричного ефекту й ультразвуку, що сприяє значному покращенню санітарно-гігієнічних умов праці. Запропоновано вдосконалену структуру автоматизованої системи керування аероіонним режимом робочої зони виробничих об'єктів під час штучної іонізації зволоженого повітря за рахунок використання вентиляційної системи та генератора аероіонів. Це вможливить здійснення моніторингу й обробки інформації про технологічні, електричні та мікрокліматичні параметри, а також налаштування, узгодження роботи та спільне керування ультразвуковим генератором аероіонів і пристроями вентиляційної системи.*

***Ключові слова:** аероіонний режим, балоелектричний ефект, ультразвукова кавітація, робоча зона, виробниче приміщення.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.88-101>

### Вступ

Концентрація аероіонів обох полярностей у повітрі виробничого середовища є дуже важливим показником його якості, оскільки для виробничого середовища є характерною наявність у багатьох випадках чинників іонізації та деіонізації повітря у вигляді електротехнічного обладнання, кондиціонерів, персональних комп'ютерів тощо. Водночас, значний вплив на зазначені показники матиме присутність людей. За таких умов концентрації аероіонів можуть змінюватись непередбачуваним чином.

Аналіз впливу аероіонів на організм людини [1] показав, що збільшення концентрації негативно заряджених аероіонів сприяє зниженню відчуття втоми під час виконання робіт різного типу. Водночас, нормалізується обмін речовин, полегшується дихання, підвищуються розумова та фізична працездатність. Отже, загалом відбувається зміцнення нервової системи людини за рахунок підвищення її стресостійкості.

Так, достатньо вивченими є також питання утворення аероіонів за наявності двооксиду карбону ( $\text{CO}_2$ ) та розроблення, ґрунтуючись на зазначеному, математичних моделей здійснення моніторингу концентрацій цієї речовини у виробничих приміщеннях [2]. Проте, на сьогодні немає однозначного уявлення щодо механізмів утворення аероіонів в умовах зволоженого повітря виробничих приміщень залежно від ступеня мінералізації мікрокраплин води, які визначають вологість повітря, за наявності частинок пилу різної природи. Відсутні також дані щодо нормативів вмісту за відповідних виробничих умов. Так, лише у ДБН № 2152-80 встановлені нормативи вмісту негативних аероіонів у повітрі виробничих і громадських приміщень: необхідний мінімум – 600 аероіонів/см<sup>3</sup>, а оптимальний рівень – 3000–5000 аероіонів/см<sup>3</sup>.

Отже, актуальність дослідження полягає у визначенні механізмів впливу вологості в залежності від ступеня мінералізації води та сумісної дії балоелектричного ефекту й ультразвукової кавітації на формування аероіонного складу повітря виробничих приміщень із метою поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці робітників.

### **Аналіз літературних джерел**

Дослідження концентрацій аероіонів у повітрі виробничих приміщень безпосередньо пов'язані з вивченням впливу технічних засобів і присутності людей задля фізіолого-гігієнічного оцінювання мікроклімату сучасних офісних приміщень й адаптаційних реакцій організму робітників [3, 4]. Тому робота сучасних автоматизованих систем підтримки мікроклімату [5] ґрунтується на застосуванні комп'ютеризованих вимірювальних приладів задля збору параметрів мікроклімату промислових приміщень. Зазначені автоматизовані системи використовуються у сучасних системах витиснювальної вентиляції [6]. Значний інтерес визначається двома причинами: одна з яких – певна «нетрадиційність» методів розрахунку, а друга пов'язана з тим, що область застосування Displacement Ventilation (DV) і модифікацій – Cooled Beam, UFAD тощо, методи проєктування та регулювання на сьогодні чітко так і не визначені. Варто зазначити, що системи керування як комплексів вентиляції, так й окремих систем підтримання аероіонного складу повітря можуть будуватися за різними принципами. Відповідно, задача забезпечення оптимального рівня аероіонів у повітрі є багатофакторною, у якій усі параметри тісно взаємозалежні один від одного [7].

Саме для розв'язання таких задач застосовують інтелектуальні системи, у яких використовують засоби нечіткого керування чи генетичні алгоритми [8, 9].

Проте, незважаючи на всі переваги таких підходів, наразі не існує формальних процедур проєктування інтелектуальних систем, а основні ідеї проєктування ґрунтуються на досвіді та знаннях розробника, отримані методом спроб і помилок. Останнім часом для опису складних динамічних

процесів і підвищення якості регулювання, зокрема й багатовимірних моделей, набули поширення системи із дробновимірними регуляторами [10, 11]. Проте, у багатьох випадках до приміщення надходить зовнішнє повітря з незадовільними концентраціями аероіонів обох чи однієї полярностей, що вказує на складний механізм утворення та динаміки концентрацій аероіонів у виробничих приміщеннях протягом робочого дня.

Авторами [12] показано, що обладнання інформаційних технологій (системні блоки персональних комп'ютерів, друкувальні пристрої тощо) також здійснює вплив на іонізацію повітря. Так, існує суттєвий взаємний вплив іонізації повітря та рівнів вмісту дрібнодисперсного пилу й аерозолу у виробничому середовищі та відносної вологості повітря. У [13] відпрацьовано систему аерозольного забруднення приміщення й обрано методи контролю аерозольного забруднення. Проте, у ній не розкрито питання регулювання аероіонного складу повітря виробничих приміщень задля комплексного оцінювання санітарно-гігієнічних умов праці. На сьогодні відомими є тільки роботи, які присвячені дослідженням поліпшення аероіонного складу приміщень побутового призначення [14, 15] шляхом застосування нових марок ґрунтовок і фарб, які сприяють підвищенню концентрацій негативних аероіонів під час виконання ремонтних робіт.

Важливим окремим питанням є також те, що використання штучних іонізаторів повітря у робочих приміщеннях призводить до утворення таких шкідливих речовин, як озон й оксиди нітрогену, які за значної концентрації здійснюють несприятливий вплив на людину. Використання у таких випадках каталітичних поглиначів є дуже проблематичним і в іонізаторах повітря не практикується. Тому доцільним є пошук інших засобів іонізації повітря, у яких відсутні побічні ефекти. Так, відомо, що чинником іонізації є балоелектричний ефект [16, 17] – іонізація повітря під час механічного подрібнення води.

Проведені заміри поблизу душових установок із генерації легких аероіонів показують, що диспергування води починається з утворення молекулярних комплексів. Зокрема, встановлено, що під час роботи зволожувача повітря «Іон» в умовах термостатування водопровідної води можна спостерігати інтенсивний розвиток мікроорганізмів, навіть за кімнатної температури [13].

Отже, для усунення зазначеної проблеми необхідним є проведення експериментальних досліджень зміни концентрації аероіонів обох полярностей від ступеня мінералізації води. Так, можна очікувати, що найбільш ефективним буде подрібнювання води за спільної дії ультразвукової кавітації та балоелектричного ефекту. Використовувати зазначений спосіб іонізації повітря доцільно у приміщеннях із сильно деіонізованим повітрям, а отже, необхідно забезпечити значні обсяги генерації аероіонів.

Механізм утворення легких аероіонів під час руйнування поверхні води досі залишається нез'ясованим. Водночас, результати проведених досліджень є протилежними та суперечливими. Проте, у більшості експериментів показано, що саме балоелектричний ефект сприяє збільшенню концентрації тільки негативних аероіонів.

Отже, задля підтримання максимальної кількості аероіонів у виробничому середовищі необхідно провести низку експериментальних досліджень із використанням води різного ступеня мінералізації, температури, концентрації розчинів солоної води, зміни швидкості руху повітря й інтенсивності ультразвуку.

Дослідження цієї статті є логічним продовженням власних теоретико-експериментальних досліджень параметрів гідроаероіонного складу повітря приміщень різного типу та призначення, які відображено у наукових статтях [18–20].

## Мета роботи

Метою дослідження є підвищення рівня комфортності та працездатності робітників шляхом збільшення концентрацій негативних аероіонів у робочій зоні.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі задачі:

– виконати експериментальні дослідження змін концентрацій аероіонів обох полярностей з метою визначення фактичних рівнів іонізації повітря виробничих приміщень і встановлення необхідних меж керування їхніми концентраціями;

– експериментально визначити динаміку концентрацій аероіонів у залежності від зміни фізичних факторів під час ультразвукової іонізації повітря;

– розробити структуру автоматизованої системи керування аероіонним складом повітря виробничих приміщень з метою поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці.

## Матеріали і методи

Під час проведення експериментальних досліджень для генерації аероіонів використано малогабаритний ультразвуковий генератор аероіонів (UAG) із потужністю 10 Вт, напругою 19–24 В DC, струмом 500 мА і резонансною частотою 1,7 МГц. Вода на мембрану UAG надходила за допомогою занурювального насосу Му 108, потужністю 2,5 Вт, максимальною швидкістю потоку води 180 дм<sup>3</sup>/год.,  $h_{max}$  – 0,48–0,55 м. Для розсіювання аероіонів застосовувався вентилятор ROTEX RAT01–E, максимальної потужності 20 Вт.

Швидкість руху повітря виміряна за допомогою термоанемометра ТМ-4001, потоку повітря (обсягу) 0–9999 мм<sup>3</sup>, температури 20–50 °С, швидкості повітря 0,01–25,00 м/с.

З метою автоматизації процесу контролю використано лічильник аероіонів «Сапфір 3К», обладнаний портом RS 232 для підключення персонального комп'ютера (рис. 1). Вимірювання концентрації аероіонів виконувались за розробленою методикою [12] на серійному приладі «Сапфір 3К» за похибки вимірювання 20%. Відповідно, концентрація легких аероіонів ( $n_{zm}$ ) визначається як середнє арифметичне 24-х показів приладу, зареєстрованих безперервно протягом двох хвилин вимірювань [16]. Водночас, випадкова похибка  $\Delta\rho < \delta/3$ , що є достатньою умовою, за якої похибка вимірювань концентрацій аероіонів  $\Delta$  є рівною системній інструментальній похибці  $\delta$ .

## Результати дослідження

Математична обробка отриманих масивів даних замірів концентрацій аероіонів обох полярностей здійснювалась відповідно до [12].

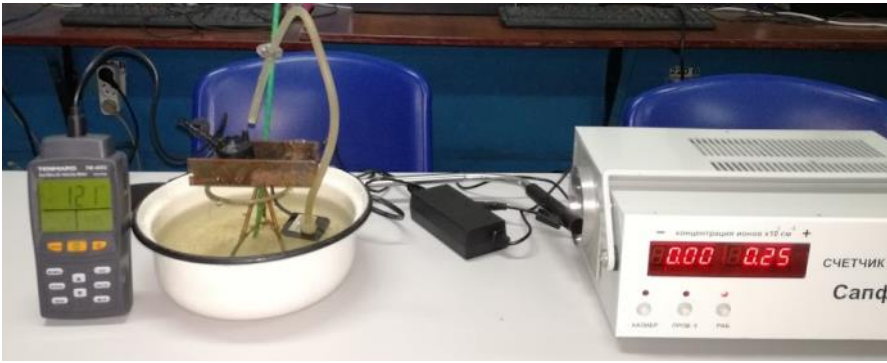
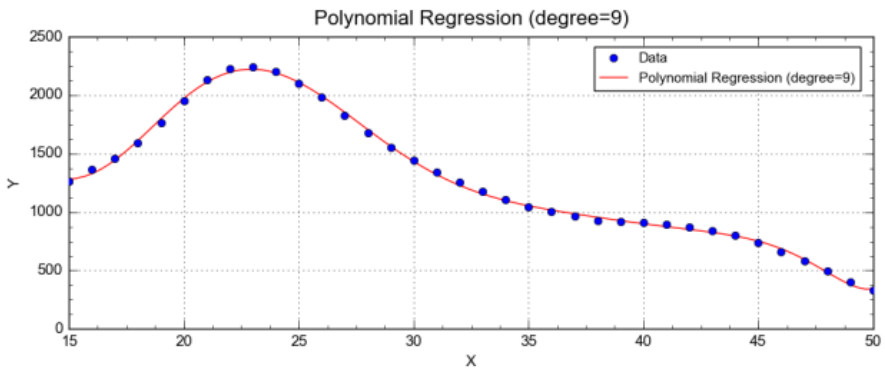
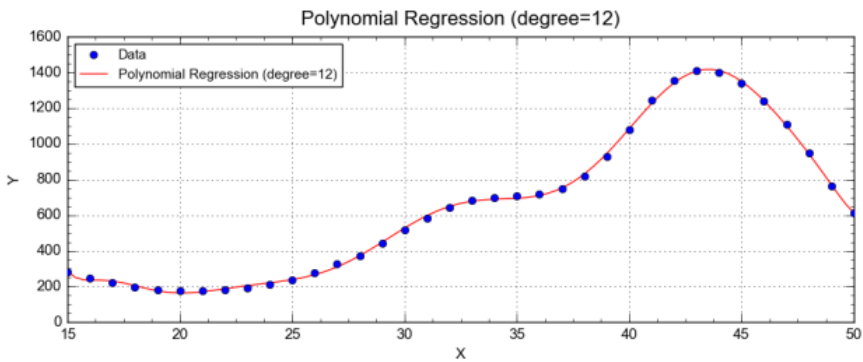


Рис. 1. Комплекс дослідження динаміки концентрації аероіонів за рахунок балоелектричного ефекту й ультразвукової кавітації

З метою встановлення залежності зміни концентрації аероіонів обох полярностей від температури водного розчину, проведено дослідження, за якого на працюючу мембрану ультразвукового генератора надходив тонкий струмінь дистильованої води з температурою в інтервалі від 15 до 50 °С. Відстань від ультразвукового генератора аероіонів до лічильника аероіонів «Сапфір 3К» – 0,5 м. Апроксимовані графіки залежностей наведені на рис. 2, а, б.



а)



б)

Рис. 2. Динаміка концентрації аероіонів за ультразвукової обробки залежно від температури дистильованої води: а – негативних (фон –  $n^- = 371 \text{ см}^{-3}$ ); б – позитивних (фон –  $n^+ = 394 \text{ см}^{-3}$ )

Аналіз отриманих експериментальних даних (рис. 2, а, б; табл. 1) показав, що найбільшій концентрації негативних аероіонів можна досягти, підтримуючи температуру від 20 до 25 °С.

Табл. 1. Функціональні залежності зміни аероіонів від температури дистильованої води

Аероіони	Апроксимуючі функції
$n^-$	$y=18,782x^3-362,8x^2+1931,1x-1258,1; R^2=0,99$
$n^+$	$y=-12,633x^3+197,92x^2-784,73x+1067,7; R^2=0,99$

Концентрація позитивних аероіонів найбільшого значення набуває при 42–45 °С, проте, після 45 °С знову спадає. Крім того, в діапазоні температур 35–37 °С спостерігається встановлення механохімічної рівноваги: концентрації негативних і позитивних аероіонів є практично однаковими. У цьому випадку швидкості утворення аероіонів обох знаків дорівнюють швидкостям рекомбінації.

Характер кривих зміни концентрації аероіонів від температури водного розчину (рис. 2, а, б) є, з одного боку, однаковим, а з іншого – графік зміни концентрацій позитивних аероіонів є віддзеркаленням графіка змін негативних аероіонів. Відрізняється лише інтенсивність піків. Необхідно також зазначити, що зі зростанням температури середовища зменшується в'язкість води, збільшується рухливість молекул води. Внаслідок цього одночасно слабшають міжмолекулярні та внутрішньомолекулярні водневі зв'язки ...Н–ОН...ОН–Н..... Зазначене полегшує утворення гідроген-аероіонів ( $H^+$ ), гідроксоній-аероіонів ( $H_3O^+$  – гідратована форма гідроген-аероіона) та гідроксил-аероіонів ( $HO^-$ ).

Оскільки молекулярна маса гідроген-аероіону становить усього лише 1 а.о., а гідроксоній-аероіонів – 19 а.о., то  $H^+$  легше виходить на поверхню зі внутрішніх прошарків води. Тому спостерігається збільшення концентрації за температури 20–25 °С. Молекулярна маса гідроксил-аероіона складає 17 а.о. На його вихід із водної товщі необхідно витратити більше енергії, що можливо за температури 42–45 °С.

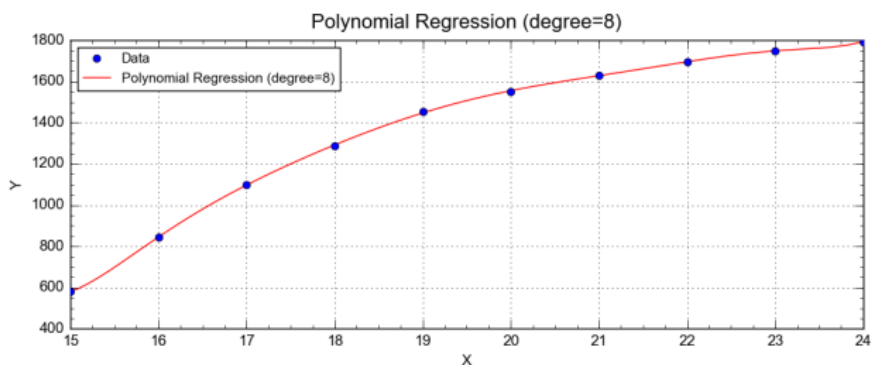
Одночасно в інтервалі температур 20–42 °С можна спостерігати поступове зниження концентрації гідроген-аероіонів і зростання гідроксил-аероіонів, що пов'язано з тим, що зі зростанням температури води на її поверхню виходять власне молекули  $H_2O$  та починається процес «розклад–рекомбінація».



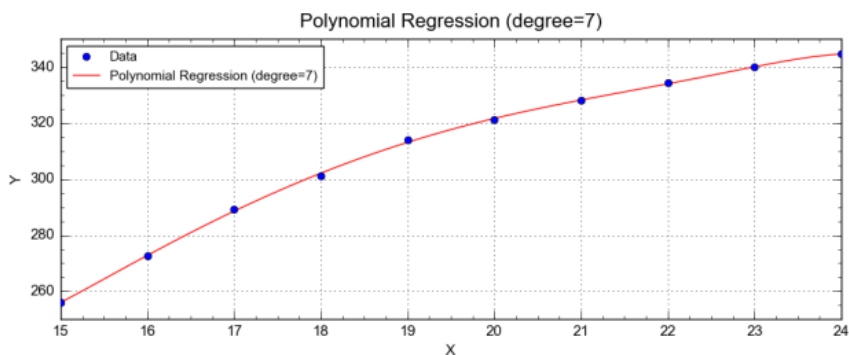
Отже, підвищення температури сприяє аероіонізації повітря виробничого середовища, й у поєднанні з явищем ультразвукової кавітації досягається додаткове зволоження повітря приміщень, що сприяє збільшенню рівня комфортності для працівників. Варто зазначити, що ультразвукова кавітація генерує акустичну кавітацію, яка за рахунок підвищеного тиску в пустотах

рідини як суцільного середовища сприяє розриву міжмолекулярних водневих зв'язків і відриву молекул води від частинок  $H_3O^+$ , виштовхуванню з товщі молекул води, що й підвищує вологість повітря виробничого середовища.

Подальше дослідження проводилося з метою встановлення залежності зміни концентрації аероіонів, коли на працюючий п'єзоелемент ультразвукового генератора, напруга якого змінювалась у межах від 16 до 24 В, надходив тонкий струмінь дистильованої води. Відстань від ультразвукового генератора аероіонів до лічильника аероіонів «Сапфір 3К» – 0,5 м. Апроксимований графік залежностей наведений на рис. 3, а, б.



а)



б)

Рис. 3. Динаміка концентрації аероіонів за ультразвукової обробки дистильованої води від напруги на UAG: а – негативних (фон –  $n^- = 371 \text{ см}^{-3}$ ); б – позитивних (фон –  $n^+ = 394 \text{ см}^{-3}$ )

Якщо за попередніми даними (рис. 2) під час іонізації повітря відбувався спільний вплив балоелектричного ефекту й ультразвукової кавітації, то у зазначеному випадку (рис. 3, а, б) спостерігається переважний вплив саме кавітаційних процесів за рахунок трансформації низької щільності енергії ультразвуку на високу щільність енергії поблизу й усередині газової бульбашки. За зростання напруги на резонансній мембрані у діапазоні від 16 до 24 В відбувається збільшення інтенсивності ультразвуку та, як наслідок, кавітаційних процесів, що зумовлює збільшення вмісту гідроіонних частинок у повітрі.



Аналіз графіків динаміки концентрації аероіонів під час ультразвукової обробки дистильованої води від напруги на UAG (рис. 3, а, б, табл. 2) показав, що концентрація негативних аероіонів збільшується практично у три рази, а концентрація позитивних практично не змінюється. Це зумовлено механохімічною природою явищ, які відбуваються, та деструктивною дією ультразвуку.

Табл. 2. Функціональні залежності зміни концентрації аероіонів від напруги на UAG

Аероіони	Апроксимуючі функції
$n^-$	$y = -134,7x^2 + 1088x - 153,7; R^2 = 0,99$
$n^+$	$y = -3,958x^2 + 60,62x + 223,3; R^2 = 0,99$

У зазначеному випадку можна вважати, що відбувається процес переорієнтації диполів води у полі впливу напруги від ультразвукового генератора аероіонів й одночасно механодеструкція у вигляді розриву хімічних зв'язків з утворенням відповідних аероіонів обох полярностей.

У такому випадку дію ультразвуку можна прирівняти до акустично-механічного впливу, оскільки здійснюється звуковий тиск на водне середовище й одночасно на хімічні зв'язки.

Так, у полі прикладення механічних сил у вигляді звукового тиску значення набувають швидкості повітряного потоку та, відповідно, рівень енергетичного виходу молекул на поверхню, тобто, вплив температури середовища з подальшим утворенням аероіонів обох полярностей. Збільшення величини напруги ультразвукового генератора аероіонів є протидією процесам рекомбінації утворених аероіонів, унаслідок чого концентрації негативних і позитивних аероіонів зростають. Після зняття напруги концентрації аероіонів зменшуватимуться за рахунок процесу рекомбінації та явищ хімічної взаємодії з домішками, які знаходяться у повітрі виробничих приміщень.

Окремо необхідно зазначити, що це дослідження проводилося за відсутності людей і за вимкненого технологічного обладнання, яке може впливати на кількість і направленість розповсюдження аероіонів у виробничому середовищі.

Проведені експериментальні дослідження дозволили запропонувати структуру автоматизованого програмно-технічного комплексу ультразвукової аероіонізації робочої зони у поєднанні з УФ-рециркулятором (рис. 4).

Одночасно з газоподібними складовими у повітрі виробничих приміщень завжди присутні частинки виробничого пилу, тому необхідним є їх уловлення шляхом зволоження робочого повітря.

Необхідна кількість негативних іонів, які здатні забезпечувати комфортний аероіонний склад і необхідну швидкість осідання виробничого пилу, задається параметром  $N^-_{\text{зад}}$ . Поточний рівень іонів на робочому місці контролюється в індивідуальній зоні комфортності робочого місця працівника за допомогою лічильника аероіонів і системи відповідних датчиків. Кількість негативних іонів у зоні комфортності працівника ( $N^-_{\text{УФ}}$  і  $N^-_{\text{УЗГА}}$ ), які згенеровані системою штучної іонізації на основі УЗГА й УФ-рециркулятора, постійно узгоджується блоком порівняння контрольних показників аероіонного складу за заданими нормативними показниками ( $N^-_{\text{зад}}$ ) та формує на основі розузгодження цих

показників сигнал ( $\epsilon$ ) системі керування (СК). СК є основним елементом, яка керує низкою підпорядкованих їй пристроїв у залежності від заданого режиму роботи та сигналу розузгодження від блоку порівняння. До них належать: насос, який забезпечує задані показники подачі води на мембрану УЗГА; вентилятор, який забезпечує необхідну швидкість руху повітряних потоків в індивідуальній зоні працівника та розповсюдження аероіонів; регулятор температури, реалізований на елементах Пельтьє для контрольованого безінерційного підтримування температурних режимів води для УЗГА; регулятор напруги, який контролює продуктивність УЗГА, та сигнал управління, який керує УФ-рециркулятором для забезпечення додаткового джерела іонів у період критично низьких показників кількості іонів і сильного запилення повітряного простору працівника. Від СК подається сигнал завдання ( $U_{керН}$ ) на перетворювач частоти (ПЧ), який керує швидкістю обертання приводного двигуна насоса ( $\omega_n$ ). Це забезпечує необхідні показники подачі води на мембрану УЗГА ( $Q$ ). Вентилятор під дією керуючого сигналу від ПЧ ( $\omega_v$ ) забезпечує необхідну швидкість руху аероіонів у робочу зону ( $V$ ). Для контрольованого безінерційного підтримування температурних режимів води для УЗГА ( $T$ ) на регулятор температури подається сигнал завдання від СК ( $U_{керТ}$ ), який, залежно від необхідного температурного режиму (охолодження чи нагрів), керує роботою двох елементів Пельтьє ( $U_T$ ). Регулятор напруги, який отримує керуючий вплив ( $U_{керГ}$ ) від системи керування, забезпечує необхідну продуктивність роботи УЗГА ( $U_G$ ).

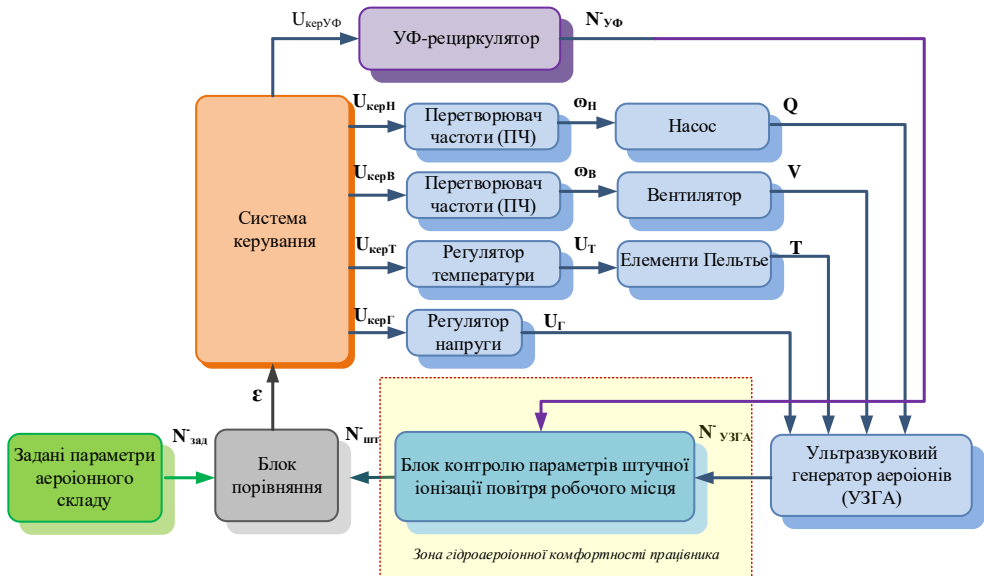


Рис. 4. Структурна схема реалізації системи керування параметрами штучної іонізації індивідуальної зони комфортності робочого місця працівника

Упровадження програмно-технічного комплексу автоматизованої системи управління ультразвуковою гідроаероіонізацією за рахунок комплексного підходу до нормування іонного складу повітря та контрольованого осадження виробничого пилу в робочій зоні цехів механічної обробки композиційних матеріалів дозволить створити комфортні та безпечні умови праці.

## Висновки

У результаті виконаного комплексного дослідження можна зробити висновок, що:

1. Використання малогабаритного ультразвукового генератора аероіонів потужністю 10 Вт на відстані 0,5 м із застосуванням дистильованої води збільшує концентрацію негативних аероіонів практично у шість разів. За рахунок спільного впливу ультразвукової кавітації поверхневого шару води та балоелектричного ефекту не відбувається генерації озону й оксидів азоту, що створює комфортний аероіонний склад повітря у робочій зоні виробничих приміщень.

2. Запропонована структура автоматизованої системи керування аероіонним складом повітря виробничих приміщень реалізує комбіновану зміну швидкості обертання вентилятора та насосу, температурного режиму водного розчину за рахунок елементів Пельтьє та потужності ультразвукового генератора аероіонів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Глива В. А. Дослідження впливу мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад повітря робочих приміщень. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2011. № 20. С. 58–65.
2. Laktionov I., Vovna O., Cherevko O., Kozlovskaya T. Mathematical model for monitoring carbon dioxide concentration in industrial greenhouses. *Agronomy Research*. 2018. Vol. 16, No. 1. PP. 134–146. <http://dx.doi.org/10.15159/ar.17.074>.
3. Назаренко В. І., Терещенко П. С., Палійчук С. П. й ін. Фізіолого-гігієнічна оцінка мікроклімату сучасних офісних приміщень та адаптаційні реакції організму офісних працівників. *Український журнал з проблем медицини праці*. 2014. № 2. С. 41–47.
4. Fletcher L. A., Noakes C. J., Sleigh P. A. et al. Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*. 2008. No. 17 ( 2). P. 173–183.
5. Laktionov I., Vovna O., Zori A. Concept of low cost computerized measuring system for microclimate parameters of greenhouses. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2017 (August). Volume 23, Issue 4. P. 668–673.
6. Laurent Magnier-Bergeron, Dominique Derome, Radu Zmeureanu. Three-dimensional model of air speed in the secondary zone of displacement ventilation jet. *Building and Environment*. 2017 (March). Vol. 114. P. 483–494.
7. Запорожець О. І. й ін. Визначення параметрів оптимальної комфортності у робочій зоні приміщення за показниками повітряного середовища. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Випуск 1/2017 (102). С. 17–21.
8. Chan-oh Min. Control of approach and landing phase for reentry vehicle using fuzzy logic. *Aerospace Science and Technology*. 2011. No. 15. P. 269–282.
9. Atiencia Villagomez J. M., Diveev A. I., Sofronova E. A. The Network Operator Method for Synthesis of Intelligent Control System. *Proceedings of the 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. 2012. P. 169–174.
10. Serhiienko I., Serhiienko S., Zagirnyak M. Improvement of the qualitative characteristics of an automatic control system with a fractional-order PID-controller. *Proceedings of 18th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/CPEE.2017.8093062.
11. Prakash J., Jayasurian S. R. Design and Implementation of Fractional-Order Controller for Fractional Order System. *Recent Advancements in System Modelling Applications*. 2013. № 188. P. 319–326.

12. Сукач С. В., Сидоров О. В. Методологічні засади підвищення якості контролю аероіонного складу повітря виробничого середовища. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. № 32. С. 127–133.
13. Акіменко В. Я., Харченко С. О. Інженерно-технічне обладнання як потенційне джерело гідроаерозольного забруднення повітря. *Актуальні питання гігієни та екологічної безпеки України: збір. тез доповідей науково-практичної конференції*. 2008. № 8. С. 11–12.
14. Peter Wallner, Michael Kundi, Michael Panny, Peter Tappler, Hans-Peter Hutter. Exposure to Air Ions in Indoor Environments: Experimental Study with Healthy Adults. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2015 (November). Vol. 12 (11). P. 14301–14311. DOI: 10.3390/ijerph121114301.
15. Untersuchungen zum Einfluss von Wandbeschichtungen auf die Ionenzahl und das Verhalten von Partikeln in der Raumluft. URL : [http://www.innenraumanalytik.at/pdfs/fraunhofer\\_ionen.pdf](http://www.innenraumanalytik.at/pdfs/fraunhofer_ionen.pdf). (assessed on 25 August 2015).
16. Толкунов І. О., Попов І. І. Вплив природних джерел аероіонізації на процес формування полів концентрації аероіонів у повітряному середовищі приміщень. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2011. Випуск 1(27). С. 243–246.
17. Kolarz P., Gaisberger M., Madl P., Hofmann W., Ritter M., Hartl A. Characterization of ions at Alpine waterfall. *Atmos. Chem. Phys.* 2012. Vol. 12. P. 3687–3697.
18. Ченчева, О. О., Лашко, Є. Є., Резнік, Д. В., Перекрест, А. Л., Божик, М. Д. (2023). Розробка та дослідження функціональних можливостей автоматизованої нечіткої системи керування якістю внутрішнього повітря виробничих приміщень. *Проблеми охорони праці в Україні*, 39(3–4), 36–42.
19. Ченчевой, В., Данова, К., Ченчева, О., Перекрест, А., Григор'єва, Д. (2020). Наукове обґрунтування оптимізації гідроаероіонного складу повітря у громадських приміщеннях для осіб із особливими потребами. *Проблеми охорони праці в Україні*, 36(4), 8–15.
20. Ченчевой В.В., Сукач С.В., Ченчева О.О., Григор'єва Д.С. Дослідження параметрів гідроаероіонного складу повітря робочого приміщення з ультразвуковою іонізацією. *ВІСТІ Донецького гірничого інституту*. No 2 (47), 2020 р., С. 168-173.

*Стаття надійшла до редакції 06.03.2024 і прийнята до друку після рецензування 17.07.2024*

## REFERENCES

1. Gliva, V. (2011). Doslidzhennya vplivu mikroklimatichnih parametriv povitroobminu na aeroionniy sklad povitrya robochih primischen. *Problemi ohoroni pratsi v Ukraini*, 20, 58–65 [in Ukrainian].
2. Laktionov, I., Vovna, O., Cherevko, O., & Kozlovskaya, T. (2018). Mathematical model for monitoring carbon dioxide concentration in industrial greenhouses. *Agronomy Research*, 16(1), 134–146. <http://dx.doi.org/10.15159/ar.17.074> [in Ukrainian].
3. Nazarenko, V. I., Tereschenko, P. S., & Paliychuk, S. P. (2014). Fiziologo-gigienichna otsinka mikroklimatu suchasnih ofisnih primischen ta adaptatsiyi reaktsiyi organizmu ofisnih pratsivnikiv. *Ukrayinskiy zhurnal z problem meditsini pratsi*, 2, 41–47.
4. Fletcher, L. A., Noakes, C. J., & Sleigh, P. A. (2008). Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*, 17, 2, 173–183.
5. Laktionov, I., Vovna, O., & Zori, A. (2017). Copncept of low cost computerized measuring system for microclimate parameters of greenhouses. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 23, 4, 668–673.

6. Magnier-Bergeron, L., Derome, D., & Zmeureanu R. (2017). Three-dimensional model of air speed in the secondary zone of displacement ventilation jet. *Building and Environment*, 114, 483–494.
7. Zaporozhets, O. I., Sukach, S. V., Galagan, O. G., & Kozlovska, T. F. (2017). Vznachennya parametriv optimalnoyi komfortnosti u robochoyi zoni primischennya za pokaznikami povitryanogo seredovischa. *Visnik Kremenchutskogo natsionalnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradskogo*, 1(102), 17–21 [in Ukrainian].
8. Chan-oh Min (2011). Control of approach and landing phase for reentry vehicle using fuzzy logic. *Aerospace Science and Technology*, 15, 269–282.
9. Atencia, Villagomez J. M., Diveev, A. I., & Sofronova, E. A. (2012). The Network Operator Method for Synthesis of Intelligent Control System. *Proceedings of the 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 169–174.
10. Serhiienko, I., Serhiienko, S., & Zagirnyak, M. (2017). Improvement of the qualitative characteristics of an automatic control system with a fractional-order PID-controller. *Proceedings of 18th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CPEE.2017.8093062>
11. Prakash, J., & Jayasurian, S. R. (2013). Design and Implementation of Fractional-Order Controller for Fractional Order System. *Recent Advancements in System Modelling Applications*, 188, 319–326.
12. Sukach, S. V., & Sidorov, O. V. (2016). Metodologichni zasady pidvischennya yakosti kontrolyu aeroionnogo skladu povitrya virobничого seredovischa. *Problemi ohoroni pratsi v Ukrayini*, 32, 127–133 [in Ukrainian].
13. Akimenko, V. Ya., & Harchenko, S. O. (2008). Inzhenerno-tehnichne obladdannya yak potentsiyne dzherelo gidroaerozolnogo zabrudnennya povitrya. *Aktualni pitannya gigieni ta ekologichnoyi bezpeki Ukrayini: zbir. tez dopovidey naukovopraktichnoyi konferentsiyi*, 8, 11–12 [in Ukrainian].
14. Peter Wallner, Michael Kundi, Michael Panny, Peter Tappler, & Hans-Peter Hutter (2015). Exposure to Air Ions in Indoor Environments: Experimental Study with Healthy Adults. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 12, 11, 14301–14311. <https://doi.org/10.3390/ijerph121114301>
15. Untersuchungen zum Einfluss von Wandbeschichtungen auf die Ionenzahl und das Verhalten von Partikeln in der Raumluft. Retrieved 2018, 29 July from [http://www.innenraumanalytik.at/pdfs/fraunhofer\\_ionen.pdf](http://www.innenraumanalytik.at/pdfs/fraunhofer_ionen.pdf)
16. Tolkunov, I. O., & Popov, I. I. (2011). Vpliv prirodnih dzherel aeroionizatsiyi na protses formuvannya poliv kontsentratsiyi aeroioniv u povitryanomu seredovischi primischen. *Zbirnik naukovih prats Harkivskogo universitetu Povitryaniv Sil*, 1, 27, 243–246 [in Ukrainian].
17. Kolarz, P., Gaisberger, M., Madl, P., Hofmann, W., Ritter, M., & Hartl A. (2012). Characterization of ions at Alpine waterfalls. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 3687–3697.
18. Chencheva, O., Lashko, Ye., Rieznik, D., Perekrest, A., & Bozhyk, M. (2023). Development and research of the functional possibilities of the automated fuzzy indoor air quality management system of production premises. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 39(3-4), 36–42 [in Ukrainian].
19. Chenchevoi, V., Danova, K., Chencheva, O., Perekrest, A., & Hrigorieva, D. (2020). Scientific substantiation of optimization of hydroaeroine air composition in public premises for persons with special needs. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 36(4), 8–15 [in Ukrainian].
20. Chenchevoi, V., Sukach, S., Chencheva, O., & Hrigorieva, D. (2020). Doslidzhennia parametriv hidroionnoho skladu poviatria robochoho prymishchennia z ultrazvukovoiu ionizatsiieiu. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 2(74), 168–173 [in Ukrainian].

*The article was received 06.03.2024 and was accepted after revision 17.07.2024*

**Сукач Сергій Володимирович**

доктор технічних наук, завідувач кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Адреса робоча:** вул. Університетська, 20, м. Кременчук, Україна, 39600

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6834-0197> **e-mail:** [sergvs69@ukr.net](mailto:sergvs69@ukr.net)

**Ченчева Ольга Олександрівна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Адреса робоча:** вул. Університетська, 20, м. Кременчук, Україна, 39600

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5691-7884> **e-mail:** [chenchevaolga@gmail.com](mailto:chenchevaolga@gmail.com)

**Козловська Тетяна Федорівна**

кандидат хімічних наук, голова циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

**Адреса робоча:** вул. Перемоги, 17/16, м. Кременчук, Україна, 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6106-5524> **e-mail:** [kozlovskaya5819@gmail.com](mailto:kozlovskaya5819@gmail.com)

**Лашко Євгеній Євгенович**

кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Адреса робоча:** вул. Університетська, 20, м. Кременчук, Україна, 39600

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9691-4648> **e-mail:** [evgeny.lashko.lj@gmail.com](mailto:evgeny.lashko.lj@gmail.com)

**Резнік Дмитро Володимирович**

кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Адреса робоча:** вул. Університетська, 20, м. Кременчук, Україна, 39600

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1258-6136> **e-mail:** [2411dimareznik@gmail.com](mailto:2411dimareznik@gmail.com)

**Ткачук Костянтин Костянтинович**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Адреса робоча:** просп. Берестейський, 37, м. Київ, Україна, 03056

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5230-9980> **e-mail:** [kkttkk297@gmail.com](mailto:kkttkk297@gmail.com)

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

UDC 533.6.013.42

**Oleksandr Trofymchuk**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Corresponding Member of NASU

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

**Oleksii Lebid**, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Deputy Director for Science

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4003-8068> **e-mail:** [o.g.lebid@gmail.com](mailto:o.g.lebid@gmail.com)

**Iurii Kaliukh**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher

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

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

## NONLINEAR WAVE MODEL OF TOWED SYSTEM AND NUMERICAL METHOD FOR ITS CALCULATION

**Abstract.** *Towed systems have found wide practical applications. Notable underwater systems for the long-distance extraction of minerals (concretions) from the ocean floor extend over 5-10 km. The existing mathematical models for solving dynamic problems of such systems in various environments are not entirely accurate regarding the diversity of wave processes. This necessitates the development of refined wave models. This article presents a new quasi-linear mathematical model describing the nonlinear four-mode dynamics of a towed system in a spatially inhomogeneous field of mass and surface forces. It is described by a nonlinear system of twelve first-order partial differential equations. The principles of boundedness and hyperbolicity are satisfied. The validation of the two-mode reduction of the model is based on the numerical solution of the problem of the propagation of two waves: longitudinal and configurational. Using a numerical algorithm and a program based on the finite difference method, a comparison of two difference schemes – Crank-Nicolson and Euler – was conducted. The main limitations for applying the finite difference method used for numerical modeling of wave propagation and reflection in a towed system are the peculiarities of the defining quasi-linear equations, which are related to the necessity of simultaneous computation of variables responsible for fast and slow processes. For such systems of equations, the term "singularly perturbed system of equations" is used. These perturbations result from the significant differences in the propagation speeds of longitudinal and configurational waves at the physical level. Consequently, it is necessary to employ special time-stepping regularization and filtering methods for numerical results. This imposes certain restrictions on the ability to model real processes and on the accuracy of the obtained results, necessitating the use of implicit difference schemes and high-frequency filtering.*

**Keywords:** *mathematical modeling, towed systems, waves, finite difference method, stability of computation.*

О.М. Трофимчук, О.Г. Лебідь, Ю.І. Калюх

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, Київ, Україна

## НЕЛІНІЙНА ХВИЛЬОВА МОДЕЛЬ БУКСИРУВАНОЇ СИСТЕМИ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД ЇЇ РОЗРАХУНКУ

**Анотація.** Буксировані системи знайшли широке застосування на практиці. Відомі підводні системи ерліфта великої протяжності для видобутку мінералів (конкрецій) з дна океану протяжністю в 5-10 км. Для вирішення завдань динаміки таких систем в різних середовищах відомі математичні моделі є не цілком коректними з точки зору врахування різноманіття хвильових процесів. Це визначає необхідність побудови уточнених хвильових моделей. У статті отримана нова квазілінійна математична модель, що описує нелінійну чотирьохмодову динаміку буксированої системи в просторово-неоднорідному полі масових і поверхневих сил. Вона описується нелінійною системою дванадцяти рівнянь першого порядку в часткових похідних. Для неї виконуються принципи граничності і гіперболічності. У сукупності з крайовими і початковими умовами модель може застосовуватися для опису динаміки і статички геометрично і фізично нелінійних стрижневих елементів, палів в ґрунті, канатів кранового обладнання, шахтних підйомників, підвісних канатних доріг, систем, що буксируються в потоці рідини і газу, ін. Апробація двохмодової редукованої моделі проведена на основі чисельного рішення задачі про поширення двох хвиль: поздовжніх і конфігураційних. За допомогою чисельного алгоритму і програми на основі методу скінченних різниць проведено порівняння двох різницевих схем: Кранка – Ніколсона та Ейлера. Основними обмеженнями для застосування методу скінченних різниць, використовуваного для чисельного моделювання поширення та відбиття хвиль у БС, є особливості визначальних квазілінійних рівнянь, що пов'язані з необхідністю одночасного обчислення змінних, відповідальних за швидкоплинні та повільні процеси. Для таких систем рівнянь використовується термін «сингулярно збурена система рівнянь». Ці збурення є наслідком значної різниці у швидкостях поширення поздовжніх, конфігураційних хвиль на фізичному рівні. У зв'язку з цим необхідно застосовувати спеціальні покровкові за часом методи регуляризації та фільтрації чисельних результатів. Це накладає певні обмеження на можливість моделювання реальних процесів та на точність отриманих результатів і змушує застосовувати неявні різницеві схеми та високочастотне фільтрування.

**Ключові слова:** математичне моделювання, буксировані системи, хвилі, метод скінченних різниць, стійкість розрахунку.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.102-111>



## Вступ

Буксирівані системи (БС) – це буксирівані системи постійної та змінної довжини в потоці рідини та газу, у космічному середовищі, підводні кабелі зв'язку, опори морських нафтових платформ та ін. Під це визначення підпадають усі механічні об'єкти, де один з лінійних розмірів як мінімум в 10-20 разів більший за два інших. БС знайшли широке застосування на практиці. Це космічні зв'язки на навколосезному просторі завдовжки десятки км; підводні нафто- та газопроводи; буксирівані системи (рис. 1 та рис. 2) [1-3]. Математичні моделі, що відображають динамічну поведінку БС в просторово-неоднорідному полі масових і поверхневих сил, зазвичай описуються нелінійними рівняннями в часткових похідних, вирішення яких можливе лише з використанням обчислювальних методів. Розвитком обчислювальних методів і алгоритмів, які можуть бути використані для математичного моделювання БС, активно займалися В.О. Горбань, Ю.Г. Кривонос, Ю.І. Калюх, І.В. Сергієнко, І.Т. Селезов, В.В. Скопецький, ін.

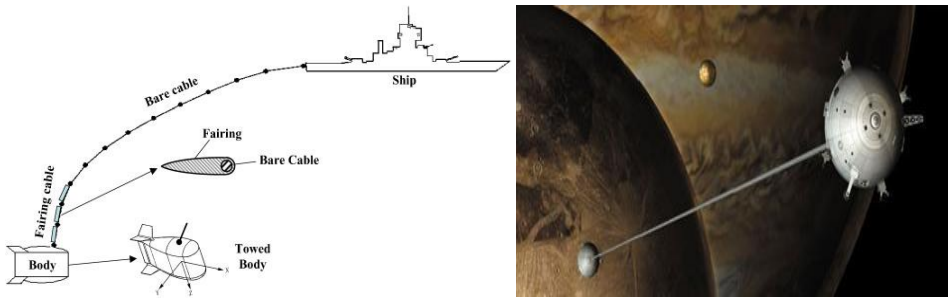


Рис. 1. Буксирівана в потоці рідини БС [2]    Рис. 2. Космічні зв'язки [3]

Проблеми чисельного моделювання нелінійних задач динаміки БС полягають у наступному:

1. Геометричний розмір (вдоль БС) на декілька порядків перевищує розмір БС в поперечному напрямку. Це призводить до складнощів при розрахунку поперечних хвиль різної природи в БС (конфігураційних, згинальних, крутильних, депланаційних тощо) з одночасною необхідністю врахування поздовжніх хвиль.

2. Застосування проєкційних методів чисельного аналізу квазілінійних рівнянь динаміки БС призводить до присутності в матричних рівняннях коефіцієнтів при невідомих, що можуть відрізнятися один від одного на декілька порядків. Як добре відомо, це призводить до великих складнощів з обчисленням оберненої матриці цих рівнянь і до необхідності застосування спеціальних методів та алгоритмів подвійної точності і т. ін.

3. У зв'язку з великою чутливістю чисельних алгоритмів до похибок в початкових і крайових умовах, складно подолати розбавку чисельних алгоритмів. Для цього необхідно застосовувати спеціальні методи та програмні високочастотні фільтри.

4. Відомі математичні моделі БС є не цілком коректними з точки зору врахування різноманіття хвильових процесів. Це визначає необхідність побудови також уточнених багатохвильових моделей БС додатково до спеціальних чисельних методів та алгоритмів їх розрахунку [4].

**Квазілінійна модель динаміки БС.** Радіус-вектор початкового положення стрижня позначимо  $\bar{R}_0(S, 0)$ , а деформованого –  $\bar{R}(S, t)$ . Введемо деформацію елемента БС:

$$\varepsilon = \frac{(dS^2 - dS_0^2)}{dS_0^2} = \left| \frac{\partial \bar{R}}{\partial S} \right|^2 - 1. \quad (1)$$

Тоді змінні  $S_0$  і  $S$ , що характеризують недеформовану та розтягнуту довжину БС, будуть пов'язані між собою співвідношенням:  $dS = \sqrt{1 + \varepsilon} \cdot dS_0$ . (2)

Введемо природну систему координат з одиничними взаємоортогональними векторами  $\bar{t}$ ,  $\bar{n}$  і  $\bar{b}$ . Вектор  $\bar{t}$  – одиничний вектор дотичної, визначається зі співвідношення:

$$\bar{t}(S, t) = \frac{\partial \bar{R}(S, t)}{\partial S}. \quad (3)$$

Два інших вектори –  $\bar{n}$  і  $\bar{b}$  – ортогональні до  $\bar{t}$ . Похідна радіус-вектора  $\bar{R}$  в деформованому стані має вигляд

$$\frac{\partial \bar{R}}{\partial S} = \bar{t}(1 + \varepsilon). \quad (4)$$

З іншого боку, для похідної від радіус-вектора  $\bar{R}(S, t)$  -  $\partial \bar{R} / \partial t$  маємо такий вираз:

$$\frac{\partial \bar{R}}{\partial t} = U_t \bar{t} + U_n \bar{n} + U_b \bar{b}. \quad (5)$$

Тут  $U_t, U_n$  і  $U_b$  – проєкції відносної швидкості на поточні одиничні вектори  $\bar{t}, \bar{n}$  і  $\bar{b}$ . Якщо долучити умови безперервності, існування похідних від радіус-вектора  $\bar{R}(S, t)$  необхідного порядку та рівності змішаних похідних, то можемо отримати наступні вирази

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial U_t}{\partial S} - k_1 U_n - k_2 U_b; \quad -(1 + \varepsilon)\Omega_1 = \frac{\partial U_b}{\partial S} - k_2 U_t + k_3 U_n; \quad (1 + \varepsilon)\Omega_2 = \frac{\partial U_n}{\partial S} + k_1 U_t + k_3 U_b. \quad (6)$$

Повні похідні кривизни  $k_i$  за часом мають вигляд:

$$\frac{\partial k_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \bar{n}}{\partial S} \bar{b} \right) = \frac{\partial b}{\partial t} \frac{\partial \bar{n}}{\partial S} + \bar{b} \left( \frac{\partial^2 \bar{n}}{\partial S \partial t} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\partial \bar{n}}{\partial S} \frac{1}{1 + \varepsilon} \right) \text{ або: } \frac{\partial k_3}{\partial t} = \frac{\partial \Omega_3}{\partial S} - k_1 \Omega_1 - k_2 \Omega_2 - \frac{k_3}{1 + \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}. \quad (7)$$

За аналогією для  $k_1$  і  $k_2$ :

$$\frac{\partial k_1}{\partial t} = \frac{\partial \Omega_2}{\partial S} + k_2 \Omega_3 + k_3 \Omega_1 - \frac{k_1}{1 + \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}; \quad \frac{\partial k_2}{\partial t} = -\frac{\partial \Omega_1}{\partial S} + k_3 \Omega_2 + k_1 \Omega_3 - \frac{k_2}{1 + \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}. \quad (8)$$

Запишемо загальні теореми про збереження кількості руху і збереження моменту кількості руху для елемента БС в векторній формі [5]:

$$\frac{\partial \bar{N}}{\partial S} + \bar{F}^{(E)} + \bar{F}^{(I)} + \bar{F}^{(M)} = 0; \quad \frac{\partial \bar{M}}{\partial S} + \bar{t} \times \bar{N} + \bar{M}^{(E)} + \bar{M}^{(I)} + \bar{M}^{(M)} = 0. \quad (9)$$

або в скалярному вигляді

$$\frac{\partial N_1}{\partial S} + k_1 N_3 - k_3 N_2 + \bar{F}^{(E)} \bar{n} + \bar{F}^{(I)} \bar{n} + \bar{F}^{(M)} \bar{n} = 0; \quad \frac{\partial N_2}{\partial S} + k_3 N_1 + k_2 N_3 + \bar{F}^{(E)} \bar{b} + \bar{F}^{(I)} \bar{b} + \bar{F}^{(M)} \bar{b} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial S} - k_1 N_1 - k_2 N_2 + \bar{F}^{(E)} \bar{t} + \bar{F}^{(I)} \bar{t} + \bar{F}^{(M)} \bar{t} = 0.$$

З закону Гука для осевого зусилля для елемента БС випливає:  $N_3 = EF\varepsilon$ , (11) де  $E$  – модуль Юнга матеріалу БС,  $F$  – площа поперечного перерізу БС до деформації,  $\varepsilon$  – відносна поздовжня деформація БС. Запишемо умови збереження моменту кількості руху в проєкціях на одиничні взаємоортогональні вектори  $\bar{t}$ ,  $\bar{n}$  і  $\bar{b}$  прийнятої системи координат [5]:

$$\frac{\partial M_2}{\partial S} + k_3 M_1 - k_3 M_3 + N_1 + \bar{m}^{(E)} \bar{b} + \bar{m}^{(I)} \bar{b} + \bar{m}^{(M)} \bar{b} = 0; \frac{\partial M_1}{\partial S} + k_1 M_3 - k_3 M_2 - N_2 + \bar{m}^{(E)} \bar{n} + \bar{m}^{(I)} \bar{n} + \bar{m}^{(M)} \bar{n} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial M_3}{\partial S} + k_1 M_1 - k_2 M_2 + \bar{m}^{(E)} \bar{t} + \bar{m}^{(I)} \bar{t} + \bar{m}^{(M)} \bar{t} = 0;$$

Для згинальних моментів  $M_1$ ,  $M_2$ , а також  $M_3$  приймемо співвідношення:

$$M_1 = -EI_{22} k_2; M_2 = EI_{11} k_1; M_3 = GJk; k = k_3 - \eta_3. \quad (13)$$

Тут  $I_{22}$ ,  $I_{11}$ ,  $J$  – моменти інерції, а  $\eta_3$  – кут закручування одиниці довжини БС.

Отримана система рівнянь (10)–(13) описує фізично та геометрично нелінійну просторову модель динаміки БС. Однак вона є параболічно-гіперболічною, так як не враховано інерцію повороту поперечного перерізу БС. Модель (10)–(13) описує тільки чотири хвилі в БС з шести (поздовжні, крутильні, згинальні (дві)), а конфігураційні (поперечні) хвилі не описує. Для усунення цього недоліку гіперболізуємо модель (10)–(13) шляхом введення кутів  $\alpha$  і  $\beta$ . Вони будуть характеризувати поворот поперечних перерізів БС, тобто деформацію зсуву в усередненому сенсі. Поперечні перерізи, плоскі до деформації, залишаються такими ж плоскими і після деформації, але, можливо, повернутими. Причому не обов'язково перпендикулярними до серединної осі БС. Матеріалізація цієї гіпотези для перерізуючих сил  $N_1$  і  $N_2$  набуває такого вигляду

$$N_1 = \alpha l_1 G F_s; N_2 = \beta l_2 G F_s, \quad (14)$$

де  $l_1$ ,  $l_2$  – коефіцієнти, що враховують вплив зсуву,  $F_s$  – площа поперечного перерізу БС. У підсумку, система рівнянь (11)–(15) може бути записана у вигляді одного матричного рівняння типу переносу в стандартній формі:

$$E \frac{\partial W}{\partial t} + B \frac{\partial W}{\partial S} = D. \quad (15)$$

Тут  $E$  – одинична матриця розмірності  $12 \times 12$ ,  $B$  – матриця конвективних членів  $12 \times 12$ . Вектор-стовпець правих частин  $D$  визначається розподіленими масовими та поверхневими силами, а також моментами цих сил. Вектор-стовпець  $D$  залежить від часу  $t$ , лагранжевої координати  $S$ , вектора-стовпця невідомих  $W$ , компонент розподілених масових і поверхневих сил.

Крайові та початкові умови для моделі (15). У верхній частині БС (при  $S = L$ ) можуть бути задані проекції швидкості  $\bar{U}$ :

$$U_t(L, t) = U_t^*(t); U_n(L, t) = U_n^*(t); U_b(L, t) = U_b^*(t). \quad (16)$$

На нижньому кінці БС (при  $S = 0$ ) можуть бути задані умови динамічної рівноваги сил  $\bar{F}_i$  і моментів  $\bar{M}_j$  на кінці БС (наприклад, на транспортованому вантажеві (приладі) рис. 1, рис. 2):

$$\sum_{i=1}^3 \bar{F}_i = 0; \quad \sum_{j=1}^3 \bar{M}_j = 0. \quad (17)$$

В якості початкових умов використовується рішення задачі статки на основі моделі (15) при  $\frac{\partial}{\partial t}(\dots) = 0$ . Модель (15) з початковими та крайовими умовами (16)–(17) являє собою замкнуту систему квазілінійних рівнянь в часткових похідних, а також початково-крайову задачу.

**Чисельний алгоритм.** Дослідниками для чисельного вирішення крайової задачі (15)–(17) (у значно спрощеному вигляді, переважно в одно-двохвильовому наближенні) використовуються кілька підходів. Найбільш поширеними серед них є метод скінченних різниць (МСР). Серед неявних

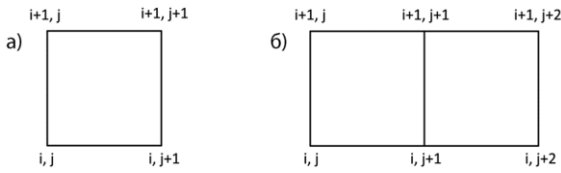


Рис. 3. Шаблони кінцево-різницевих схем Кранка – Нікольсон (а) та Ейлера (б)

різницевих схем розв’язання матричного рівняння переносу зупинимось на різницевих схемах Кранка – Нікольсон та Ейлера. Шаблони схем зображені

нижче на рис. 3. Матриця  $B$  і вектор-стовпець  $D$  є нелінійними функціями, які залежать від незалежних змінних  $t$  і  $S$ , а також інших змінних та параметрів. При порівняльному аналізі різницевих схем при розв’язанні рівняння (15) будемо виходити з квазілінеаризації коефіцієнтів матриці  $B$  і вектора-стовпця  $D$  на поточному розрахунковому кроці за часом  $t$ . При використанні різницевої схеми Кранка – Нікольсон для чисельного розв’язання системи нелінійних гіперболічних рівнянь труднощів при апроксимації крайових умов зазвичай не виникає. Застосування різницевої схеми Ейлера вимагає задання додаткових граничних умов. Розглянемо приклад БС у плоскій постановці (поздовжньо-конфігураційна (поперечна) взаємодія). На практиці зазвичай відомі чотири граничних умови: залежність координат верху БС від часу та гранична умова на її нижньому кінці. З них можна визначити крайові умови для чотирьох проєкцій швидкості –  $U_t(0,t)$ ,

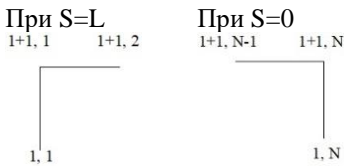


Рис. 4. Шаблони для апроксимації відсутніх граничних умов для  $T(0,t)$ ,  $\varphi(0,t)$  та  $\varphi(L,t)$ ,  $T(L,t)$  в схеми Ейлера,  $N$  – кількість елементів в різницевій схемі

$U_n(0,t)$ ,  $U_t(L,t)$ ,  $U_n(L,t)$ . Крайові умови при цьому можна апроксимувати одним з відомих способів [5]. При використанні різницевої схеми Ейлера необхідні ще чотири граничних умови на  $T(0,t)$ ,  $\varphi(0,t)$  та  $\varphi(L,t)$ ,  $T(L,t)$  в плоскій задачі. Апроксимацію відсутніх граничних умов для  $T(0,t)$ ,  $\varphi(0,t)$  та  $\varphi(L,t)$ ,  $T(L,t)$  можна здійснити декількома способами. Ми використаємо наступні шаблони, що зображені на рис. 4, для лівого (верхнього) кінця БС і правого (нижнього)

кінця БС. Для порівняння ефективності та точності розв’язання рівнянь динаміки БС на основі різницевої схеми Ейлера і різницевої схеми Кранка – Нікольсон проведемо тестування чисельних алгоритмів та програм окремо та у порівнянні. Розглянемо обчислення модельної задачі для наступних крайових умов, де горизонтальна швидкість  $V$  на верхньому кінці БС при  $S = L$ :

$$V = \begin{cases} V_1 & t \leq 0 \\ V_1 + 0.05t & t \in [0; 20] \\ V_2 & t \in [20; \infty] \end{cases} \quad (18)$$

При таких фактичних даних БС: довжина системи – 200 м ( $L$ ); коефіцієнт опору тертя – 0.01 ( $k_f$ ); коефіцієнт опору форми – 0.2 ( $k_n$ ); ефективний розтяг БС – 0.014 ( $e$ ); ефективна ширина обтікача по міделю – 0.05 м ( $d_0$ ); від’ємна плавучість лінії – 25,4 Н/м ( $\omega$ ); ефективна погонна маса (маса і приєднана

маса) обтікача – 2.5 кг/м ( $m + M$ ); ефективна маса заглиблювача – 500 кг ( $M^*$ ); його коефіцієнт опору – 0.5 ( $K^*$ ); площа міделевого перерізу заглиблювача – 0.2 м<sup>2</sup> ( $Z^*$ ); заглиблююча сила – 4000 Н ( $P^*$ ).

**Результати порівняльних розрахунків** для відносних похибок у відсотках для різницевої схеми Кранка – Нікольсон наведено в таблиці 1, а для різницевої схеми Ейлера – в таблиці 2. Внаслідок сингулярності матриці  $B$ , для придушення шкідливих високочастотних осциляцій рішення застосовувалось усереднення результатів первісних розрахунків на трьох послідовних кроках за часом за формулою:

$$Y_i^J = \frac{Y_i^{J-1} + Y_i^J + Y_i^{J+1}}{3}. \quad (19)$$

Тут  $Y_i^J$  – позначення однієї з величин  $U_i, U_n, T, \varphi$ ;  $i$  – крок за координатою;  $J$  – крок за часом. Обчислення відносної похибки осьового зусилля  $T$  і кута нахилу  $\varphi$ , відносних дотичної  $u_t$  та нормальної  $u_n$  швидкостей БС здійснювалося за формулами:

$$\Delta T = \left| \frac{T_f - T}{T} \right|, \Delta \varphi = \left| \frac{\varphi_f - \varphi}{\varphi} \right|, \Delta u_t = \left| \frac{u_{t_f} - u_t}{u_t} \right|, \Delta u_n = \left| \frac{u_{n_f} - u_n}{u_n} \right|, \quad (20)$$

де  $T_f, \varphi_f, u_{t_f}, u_{n_f}$  – значення змінних, отримані на подрібненій в два рази різницевій сітці Кранка – Нікольсон (Ейлера),  $T, \varphi, u_t, u_n$  – значення змінних, отримані на первісній різницевій сітці Кранка – Нікольсон (Ейлера).

Таблиця 1. Порівняння результатів розрахунків на різницевій схемі Кранка – Нікольсон при  $\Delta t = 0.2$  сек. і  $\Delta S = 30$  м, а також на подрібненій в два рази – при  $\Delta t = 0.1$  сек. і  $\Delta S = 15$  м

Час (с)	S (м)	$\Delta T, \%$	$\Delta \varphi, \%$	$\Delta u_t, \%$	$\Delta u_n, \%$
6.4	0	0,7	0,6	5,6	3,4
6.4	30	0,8	1,2	9,4	3,4
6.4	60	0,9	3,2	9,2	0,0
6.4	90	1,0	2,3	9,1	0,6
6.4	120	1,2	2,7	9,6	1,5
6.4	150	1,5	2,7	11,6	2,7
25.6	0	0,6	0,7	0,0	0,7
25.6	30	0,7	0,8	0,1	0,7
25.6	60	0,7	1,4	0,3	8,9
25.6	90	0,9	2,1	0,5	1,3
25.6	120	1,0	2,1	0,6	2,7
25.6	150	1,1	1,0	0,3	0,1
64.0	0	0,8	0,0	0,0	0,3
64.0	30	0,9	0,4	0,0	0,5
64.0	60	1,0	0,6	0,7	1,0
64.0	90	1,1	1,9	0,3	1,8
64.0	120	1,3	1,6	0,8	1,6
64.0	150	1,5	2,1	2,4	0,2

Таблиця 2. Порівняння результатів розрахунків на різницевій схемі Ейлера при  $\Delta t = 0.2$  сек. і  $\Delta S = 30$  м, а також на подрібненій в два рази ( $\Delta t = 0.1$  сек. і  $\Delta S = 15$  м)

Час (с)	S (м)	$\Delta T, \%$	$\Delta \phi, \%$	$\Delta u_t, \%$	$\Delta u_n, \%$
6.4	0	1,3	0,0	0,0	1,0
6.4	30	0,2	6,1	3,1	1,8
6.4	60	1,0	0,3	0,5	5,3
6.4	90	1,2	4,9	5,03	4,5
6.4	120	0,8	12,7	4,0	6,3
6.4	150	0,4	5,7	2,4	10,6
12.8	0	3,1	1,6	0,4	1,3
12.8	30	3,6	2,7	1,6	8,4
12.8	60	3,0	8,0	1,1	6,0
12.8	90	5,8	10,1	2,2	6,0
12.8	120	2,1	18,2	5,3	26,3
12.8	150	10,1	24,4	38,0	25,0
64.0	0	7,1	1,7	4,8	15,5
64.0	30	8,3	2,1	15,4	19,8
64.0	60	7,4	2,1	1,6	6,4
64.0	90	12,2	35,1	11,3	9,5
64.0	120	8,4	5,5	2,1	44,2
64.0	150	23,4	11,3	2,7	72,9

Порівняльний аналіз похибок різницевих сіток Кранка – Нікольсон та Ейлера проведемо по максимальній похибці в один момент часу. З табл. 1 випливає, що чисельний алгоритм на основі різницевої схеми Кранка – Нікольсон має необхідну точність і може бути використаний для чисельного моделювання перехідних процесів в БС. При цьому різниця в силових і геометричних характеристиках напружено-деформованого стану БС, отриманих на грубій і подрібненій різницевих сітках, є *незначною* (в середньому не більше 5–8%), крім перехідного режиму руху з прискоренням, коли відмінності можуть збільшуватися до 20%. З табл. 2 випливає, що чисельний алгоритм на основі різницевої схеми Ейлера має меншу точність у порівнянні з різницевою схемою Кранка – Нікольсон, а тому її використання для чисельного моделювання перехідних процесів в БС залишається під питанням. Різниця в силових і геометричних характеристиках БС, отриманих на грубій і подрібненій різницевій схемі Ейлера, є більшою в порівнянні з відмінностями при використанні різницевої схеми Кранка – Нікольсон.

**Висновки**

1. Незважаючи на численні дослідження, проведені в області вивчення статички і динаміки БС, неясними залишаються багато особливостей їх поведінки: проблеми петлеутворення в БС при буксируванні в космосі, повітрі та водному середовищі, правильний вибір коефіцієнта динамічності при складних маневрах буксирувальника і т.д. [6-14].

2. Розглянуто особливості застосування МСР для обчислення нелінійних динамічних задач БС. Основними обмеженнями для застосування МСР, використовуюваного для чисельного моделювання поширення та відбиття хвиль у БС, є особливості визначальних квазілінійних рівнянь, що пов'язані з необхідністю одночасного обчислення змінних, відповідальних за швидкоплинні та повільні процеси. При розв'язанні СЛАР, враховуючи погану обумовленість матриці, експериментальним обчислювальним шляхом було обрано метод регуляризації.

3. Розрахунки за різницевою схемою Кранка – Нікольсон навіть на грубих сітках можуть давати результати з необхідним ступенем точності. Причому витрати часу при цьому будуть мінімальними. Інша картина спостерігається при порівнянні результатів на грубій і більш дрібній сітках для різницевої схеми Ейлера. Непереборні помилки, що вносяться похибками апроксимації відсутніх граничних умов, призводять до більших відмінностей.

## REFERENCES

1. Mechanical behavior of submarine cable under coupled tension, torsion and compressive loads. Retrieved 12.02.2021 from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801819304470>
2. Combination of Acoustics with High Resolution Oceanography. Retrieved 12.02.2021 from: [https://www.researchgate.net/publication/228540255\\_Combination\\_of\\_Acoustics\\_with\\_High\\_Resolution\\_Oceanography/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/228540255_Combination_of_Acoustics_with_High_Resolution_Oceanography/figures?lo=1)
3. Jelektrodinamicheskie svjazki [Electrodynamic connections]. Retrieved 12.02.2021 from: <http://galspace.spb.ru/index116.html>
4. Selezov, I.T. (2018). Development and Application of the Cauchy–Poisson Method to Layer Elastodynamics and the Timoshenko Equation. *Cybern Syst Anal*, 54, 434–442. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0044-x>
5. Hegemier, G.A., & Nair, S. (1977). A nonlinear dynamical theory for heterogeneous, anisotropic, elastic rods. *AIAA*, 15 (1), 8–15.
6. Kaliukh, I., & Berchun, Y. (2020). Four-Mode Model of Dynamics of Distributed Systems. *J. of Automation and Information Sciences*, 52 (2), 1–12.
7. Trofymchuk, O., Lebid, O., Berchun, V., Berchun, Y., & Kaliukh, I. (2022). Ukraine's Cultural Heritage Objects Within Landslide Hazardous Sites. In: Vayas, I., Mazzolani, F.M. (eds) *Protection of Historical Constructions. PROHITECH 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 209. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-90788-4\\_73](https://doi.org/10.1007/978-3-030-90788-4_73)
8. Kaliukh, I., Dunin, V., & Berchun, Y. (2018). Decreasing Service Life of Buildings Under Regular Explosion Loads. *Cybern Syst Anal*, 54, 948–956. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0098-9>
9. Kaliukh, I., Vasylenko, V., Berchun, Y., Vapnichna, V., Sedin, V., & Tytarenko, O. (2023). The Computational Intelligence application for assessing the technical state of a multi-storey building damaged by an explosion. In *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2023, (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312914>
10. Kaliukh, I., Dunin, V., Trofymchuk, O., 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. *Cybern Syst Anal*, 59, 612–623. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00596>
11. Trofymchuk, O.M., Dunin, V.A., & Kyrash, S.Y. (2022). Dynamic certification and assessment of the buildings life cycle under regular explosive impacts. *System research and information technologies*, 4, 100–118. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2022.4.09>

12. Kaliukh, I., & Lebid, O. (2021). Constructing the Adaptive Algorithms for Solving Multi-Wave Problems. *Cybern Syst Anal*, 57, 938–949. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00419-w>
13. Kaliukh, I., Trofymchuk, O. & Lebid, O. (2023). Peculiarities of Applying the Finite-Difference Method for Solving Nonlinear Problems of the Dynamics of Distributed Systems in a Flow. *Cybern Syst Anal* 59, 120–133. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00548-4>
14. Trofymchuk, O., Kaliukh, Y., Dunin, V., & Berchun, Y. (2018). On the Possibility of Multi-Wavelength Identification of Defects in Piles. *Cybernetics and Systems Analysis*, 54, 600–609. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0061-9>

*Стаття надійшла до редакції 05.06.2024 і прийнята до друку після рецензування 27.08.2024*

*The article was received 05.06.2024 and was accepted after revision 27.08.2024*

**Трофимчук Олександр Миколайович**

доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ  
**Адреса робоча:** 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** trofymchuk@nas.gov.ua

**Лебідь Олексій Григорович**

доктор технічних наук, старший дослідник, заступник директора з наукової роботи Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України  
**Адреса робоча:** 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4003-8068> **e-mail:** o.g.lebid@gmail.com

**Калюх Юрій Іванович**

доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник відділу природних ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ  
**Адреса робоча:** 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7240-4934> **e-mail:** kalyukh2002@gmail.com



УДК 65.011.56

**Serhiy Bushuev**, Dr.Sc., professor, head of the Department of Project Management  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7815-8129>

**Andriy Ivko**, PhD, doctoral student of the Department of Project Management  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3388-8355>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## FRAMEWORK MODEL OF SYNCRETIC MANAGEMENT OF INNOVATIVE PROJECTS

**Abstract.** *The contemporary business landscape demands agility, innovation, and the seamless integration of diverse approaches. Traditional project management methods often struggle to adapt to this dynamic environment. This abstract introduces the framework model of syncretic management for innovative projects. Syncretic management emphasizes the unification of various elements to achieve a cohesive whole. In this context, it signifies a framework that blends methodologies and tools to optimize project outcomes. Key components include – Interdisciplinary Collaboration, Agile Methodologies, AI Integration. The syncretic management model offers several advantages – Enhanced Innovation, Improved Efficiency, Increased Adaptability. Reduced Risks: data-driven insights from AI facilitate proactive risk identification and mitigation strategies. Paper provides a concise overview of the syncretic management model for innovative projects. Subsequent sections will explore the core components of this framework in greater detail, delve into its practical applications, and discuss potential challenges and considerations for successful implementation.*

**Keywords:** *Syncretic Management, Innovative Projects, Framework Model, Agile methodology.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.112-122>

### Introduction

Syncretic Management is an integrative approach to project management that blends elements from various management methodologies, disciplines, and technologies to create a cohesive and adaptive framework. This approach is particularly relevant to innovative projects, which are characterized by high levels of complexity, uncertainty, and the need for rapid adaptability.

The current business landscape is characterized by rapid change, intense competition, and a growing emphasis on innovation. Traditional project management approaches often struggle to keep pace with this dynamic environment. To address these challenges, a new framework is emerging: the syncretic management model for innovative projects.

Syncretic management refers to a philosophy that integrates diverse elements to achieve a unified whole. In the context of innovative projects, this translates to a framework that seamlessly blends various approaches and tools to optimize project outcomes.

The contemporary business landscape demands agility, innovation, and the ability to navigate constant change. Traditional project management approaches, often rigid and siloed, struggle to keep pace with this dynamic environment. To address these challenges, a novel framework is emerging – the framework model of syncretic management for innovative projects.

Syncretic management emphasizes the unification of diverse elements to achieve a cohesive whole. In the context of innovative projects, this translates to a framework that seamlessly blends methodologies and tools to optimize project outcomes. This model fosters a culture of creativity and adaptability, crucial for success in today's ever-evolving marketplace.

Syncretic management represents a forward-thinking approach to project management, particularly suited for innovative projects in today's fast-paced, technology-driven environment. By blending diverse methodologies and leveraging advanced technologies, it offers a robust framework that is both adaptable and resilient, capable of navigating the complexities and uncertainties inherent in innovative endeavors.

The core components of the syncretic management model provide a comprehensive framework that combines traditional project management practices with the latest advancements in AI technology. This integrative approach enables organizations to effectively manage innovative projects, ensuring they are adaptable, efficient, and ethically sound.

**The goal** of the research is to introduce and define the framework model of syncretic management for innovative projects. This involves explaining the core principles behind syncretic management and how it integrates various approaches (interdisciplinary collaboration, agile methodologies, AI integration) to optimize the success of innovative projects. To explore the benefits and potential applications of the syncretic management model. This could involve discussing how the model fosters innovation, improves efficiency, increases adaptability, and reduces risks in innovative project management. The paper might also showcase real-world examples or case studies demonstrating how organizations have successfully implemented this framework.

## 1. Literature review

The seventh version of the PMI PMBOK knowledge system [1] formed the prerequisites for the implementation of syncretic management. At the same time, the integration of project management methodologies with artificial intelligence systems is not foreseen. This is due to the release date of the knowledge system long before the appearance of industrial versions of artificial intelligence systems.

The system of knowledge on the management of innovative projects and programs P2M [2] also provides for the integration of essentially different methodologies, including Agile, but the use of artificial intelligence in the processes of managing innovative projects is not discussed.

The paper [3] claims that artificial intelligence can replace people in innovation management, requiring companies to rethink their innovation processes and consider the possibilities of digital transformation. This confidence is based on the expectation that versions of "general artificial intelligence" will be released in the near future.

In [4], it is emphasized that artificial intelligence can improve project management by managing stakeholders' expectations, resolving conflicts, and ensuring flawless project support and execution, but there are no examples or ideas about integration with artificial intelligence.

Technological progress in the field of artificial intelligence is leading to the development of human-like machines capable of operating autonomously and imitating cognitive behaviour. The progress and interest among managers, academics, and the public has created excitement in many industries, and many firms are investing heavily to capitalize on the technology through business model innovation [5]. However, managers are left without support from academia when they seek to introduce AI into their firm's operations, leading to an increased risk of project failure and undesirable outcomes.

In the study [6], it is determined that AI has the potential to revolutionize the economy and society, but to ensure its successful implementation and future impact, it is necessary to solve industry problems and develop research programs for the effective application of artificial intelligence.

In [7] aspects of smartization of artificial intelligence models are considered. An integrated model of the competencies of artificial intelligence application specialists is proposed. The model is a dynamic and multidimensional system of competencies. This study was built within this model.

Convergence of knowledge, rapid progress in the application of artificial intelligence and the need for adapted project management to stimulate innovation and effective communications create fertile ground for research in certain fields of knowledge [8]. Although the specific field of "syncretic management" for AI-driven projects is still emerging, there is a need to find relevant application ideas scattered across several fields of activity in the digitalization and development management of complex systems.

The work [9] is devoted to the application of the entropy approach in managing the dynamics of the development of organizations. At the same time, information entropy is considered as an element of resistance to the development of organizations. These studies are fundamental to understanding the impact of uncertainty when applying artificial intelligence in organizational development projects.

The work [10] examines the problems of the interaction of interested parties in the processes of sustainable development. At the same time, artificial intelligence is not a driver of interaction and decision-making. This significantly reduces the effectiveness of the actions of project managers. The work [11] is devoted to the study of the model of syncretic management, competition and cooperation in the field of economic development. The models and methods considered in this study do not take into account the development of artificial intelligence, which reduces the effectiveness of applications of syncretic management of innovative projects. Interesting results were obtained in [12], where a syncretic control model based on the "win-win" model was used. This allowed stakeholders to engage in sustainable development processes without the use of artificial intelligence technologies.

The work [13] examines the problems of strategic management based on sustainable development in the Industry 4.0 model based on social responsibility. At the same time, the transition to Knowledge Industry 5.0 opens up fundamentally new opportunities in managing sustainable development.

Problems of value creation based on cross-sector cooperation are studied in [14]. A value approach is key from the point of view of sustainable development management. At the same time, an important role is played by the processes of digitization and the use of artificial intelligence, which is not taken into account in the research.

The paper [15] examines the issues of sustainable development of social organizations based on the hybridization of management of public organizations. This is an important direction of application of syncretic management. But the transition to the Industry 5.0 economy significantly reduces the practical application of the authors' proposals.

The model of sustainable development based on innovations within the framework of collaboration of cross-sector business models to create a multi-level, dynamic organizational environment is considered in work [16]. This is an important step in the development of syncretic management.

## **2. The Principle of Augmented Competency in Managing innovation Projects in an Artificial Intelligence Environment**

Artificial intelligence (AI) is becoming an integral part of modern innovation projects, transforming approaches to management, planning and execution of tasks. The principle of augmented competence is the use of AI to increase the efficiency and effectiveness of human activity in innovation project management.

In the modern world, where artificial intelligence (AI) is rapidly developing, its influence on various spheres of activity is becoming more and more noticeable. Innovation project management is no exception. Augmented Competency Principles offer a new approach to innovation project management that uses AI to strengthen and expand the capabilities of management teams.

The essence of the principle of augmented competence is that AI does not replace human project managers, but complements their knowledge, skills and experience. AI can automate routine tasks, analyze large amounts of data, provide recommendations and predictions, freeing up time for human team members to focus on more complex and creative tasks.

Let's consider the advantages of using the principle of enhanced competence. This is improved efficiency and productivity based on the automation of tasks and the provision of new knowledge, which leads to a significant improvement in the efficiency and productivity of the project team. Data-driven AI recommendations and predictions help teams make more informed and effective decisions. Access to new knowledge and insights drives innovation and leads to new ideas and solutions. At the same time, AI de-risking helps identify and mitigate potential risks, which can lead to more successful projects.

Examples of the use of the principle of augmented competence in innovation project management are related to the use of AI to automate software testing, customer data analysis can help companies better understand their customers and their needs, which can lead to improved marketing campaigns and products, demand forecasting can help companies better manage your inventory, which can lead to lower costs and better customer service.

The principles of augmented competence do not mean that AI should replace human project managers. Instead, AI should be used as a tool to empower human teams and help them achieve better results.

As AI technologies continue to evolve, the principle of augmented competence is likely to become even more important for innovation project management. AI can help teams overcome complex challenges, make better decisions, and succeed in a more changing and competitive environment.

This is just the beginning of research in the field of augmented competence. Let's take a closer look at its concepts, advantages, examples of use and mathematical modelling.

The purpose of the article is to research the principles of enhanced competence, conduct a SWOT analysis of applications, and build a mathematical model of the implementation of enhanced competence within the Agile methodology.

### **3. SWOT analysis of enhanced competence in innovation project management**

A SWOT analysis of enhanced competence in innovation project management shows that the use of AI can significantly increase the company's efficiency, productivity and competitiveness (Table 1). However, the high cost of implementation, technical limitations, and potential ethical and regulatory challenges must be taken into account in order to succeed. By leveraging strengths and opportunities, companies can successfully integrate AI into their processes, minimizing risks and maximizing benefits.

The SWOT analysis showed that the added competence that uses the capabilities of artificial intelligence (AI) in the management of innovation projects has significant advantages. Key strengths include increased efficiency, more informed decisions, resource optimization, improved communications and reduced risk. The integration of AI allows project managers to focus on strategic aspects of management, improving overall productivity and quality of project execution.

At the same time, the SWOT analysis revealed weaknesses in the use of additional competence. These include high initial implementation costs, dependence on data quality, complexity of integration, technical limitations, and the need for changes in organizational culture. The implementation of AI requires significant financial and human resources, as well as the company's readiness to adapt new approaches and technologies.

Analysis of opportunities shows that the use of additional competence opens wide prospects for companies. The implementation of AI can contribute to the development of innovative products and services, the expansion of markets, improved customer satisfaction and increased competitiveness. In addition, AI helps manage complex projects more efficiently by providing better coordination and control.

However, there are also threats that can affect the success of AI implementation. These are high competition, regulatory changes, technological risks, ethical issues and economic instability. Companies need to be prepared to meet these challenges by implementing appropriate strategies to minimize risks and protect their investments in new technologies.

A SWOT analysis of enhanced competence in innovation project management shows that the use of AI has significant potential to improve the efficiency and competitiveness of companies. Key benefits include improved decision-making, resource optimization, increased productivity and reduced risk. However, high initial costs, complexity of integration, and potential ethical and regulatory challenges must be considered for successful implementation. Companies that are ready to invest in AI and adapt new approaches will be able to make the most of its opportunities and gain competitive advantages in the market.

Table 1. SWOT analysis of enhanced competence in IT project management

<p><b>Strengths</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Increased efficiency Using AI to analyze and automate routine tasks allows managers to focus on strategic aspects of project management.</li> <li>2. More reasonable decisions AI's analytical capabilities provide deep data analysis and forecasting that helps make more informed decisions.</li> <li>3. Optimization of resources AI helps to optimally allocate resources, reducing costs and increasing team productivity.</li> <li>4. Improvement of communications Intelligent communication systems facilitate better interaction between team members and stakeholders, increasing overall coordination.</li> <li>5. Reduction of risks Through forecasting and data analysis, AI allows better identification and minimization of risks, which increases the overall safety of the project.</li> </ol>	<p><b>Weaknesses</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. High initial costs Implementation of AI technologies requires significant financial investment in development, implementation and training of personnel.</li> <li>2. Dependence on data quality The effectiveness of AI strongly depends on the quality and volume of available data. Insufficient or unreliable data can lead to incorrect predictions and decisions.</li> <li>3. Complexity of integration Integrating AI into existing processes can be complex and require significant effort from the IT department and management.</li> <li>4. Technical limitations AI technologies still have limitations that can affect the accuracy and reliability of the results obtained.</li> <li>5. Change of organizational culture Implementation of AI requires changes in the organization's culture and ways of working, which may be met with resistance from the staff.</li> </ol>
<p><b>Opportunities</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Innovative products and services Using AI opens up new opportunities for creating innovative products and services, which can become a competitive advantage in the market.</li> <li>2. Expansion of markets Thanks to optimization and increased efficiency, the company can expand its activities to new markets and segments.</li> <li>3. Improvement of customer satisfaction More accurate forecasting of customer needs and adaptation of services to these needs increase the level of customer satisfaction.</li> <li>4. Increasing competitiveness Using advanced management technologies allows the company to stay ahead of competitors by offering better and more efficient solutions.</li> <li>5. Management of complex projects AI helps manage complex projects more effectively, providing better coordination and control over all aspects of the project.</li> </ol>	<p><b>Threats</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Competition Competitors may also introduce advanced technologies, which reduces uniqueness and competitive advantage.</li> <li>2. Regulatory changes Implementation of new technologies may face regulatory restrictions and data security and privacy requirements.</li> <li>3. Technological risks Technological failures and cyberattacks can significantly affect the operation of AI systems and the overall security of the project.</li> <li>4. Ethical issues The use of AI raises ethical questions about privacy, transparency and fairness of decision-making.</li> <li>5. Economic instability Economic fluctuations and volatility may affect investments in new technologies and a company's ability to innovate.</li> </ol>

#### 4. Method of Syncretic Management of Innovative Projects

The syncretic management model for innovative projects proposes a framework that integrates various approaches and tools to optimize project outcomes. This section dives deeper into the core methods that make up this framework. Key elements of Syncretic management of innovative projects presented on fig. 1.



Fig. 1. Key elements of Syncretic Management of Innovative Projects

Let's define each element.

##### 4.1. Interdisciplinary Collaboration:

- **Rationale:** Innovation often thrives at the intersection of diverse expertise. Bringing together individuals from various backgrounds, such as engineering, design, marketing, and data science, fosters creative problem-solving and the generation of novel ideas.
- **Methods:**
  - Forming cross-functional teams with members from different disciplines.
  - Implementing brainstorming sessions that encourage diverse perspectives.
  - Utilizing knowledge-sharing platforms to facilitate collaboration and communication between team members.

##### 4.2. Agile Methodologies:

- **Rationale:** Traditional project management approaches can be rigid and struggle to adapt to the inherent uncertainties of innovative projects. Agile methodologies offer a more flexible and iterative approach.
- **Methods:**
  - Adopting frameworks like Scrum or Kanban, which emphasize short development cycles, continuous feedback loops, and a focus on delivering value iteratively.
  - Embracing rapid prototyping to test and refine ideas quickly.
  - Encouraging open communication and adapting project plans based on feedback and emerging requirements.

### 4.3. AI Integration:

- **Rationale:** Artificial intelligence (AI) can offer valuable tools for data analysis, risk prediction, and automation of routine tasks. This frees up human resources to focus on more strategic endeavors and creative problem-solving.
- **Methods:**
  - Utilizing AI for tasks like data analysis, identifying trends and patterns in complex datasets.
  - Implementing AI-powered risk prediction models to proactively identify and mitigate potential challenges.
  - Automating routine administrative tasks and data entry processes, allowing team members to focus on higher-value activities.

### 4.4. Integration and Synergy:

- The success of the syncretic management model hinges on the seamless integration of these core methods.
- Interdisciplinary collaboration fosters a culture of innovation, which is then supported by the iterative nature of agile methodologies. AI tools further empower this process by providing data-driven insights and streamlining workflows.

## 5. Mathematical Syncretic Management Models of Innovative Projects

In the ever-evolving landscape of innovative project management, the integration of mathematical models provides a robust framework for optimizing processes, predicting outcomes, and mitigating risks. Syncretic management models, which combine multiple methodologies and leverage advanced technologies such as Artificial Intelligence (AI), offer a holistic approach to managing complex projects. This introduction outlines the fundamental aspects of mathematical models within the syncretic management framework and their significance in innovative project management.

Mathematical models serve as the backbone of the syncretic management approach, enabling precise planning, execution, and monitoring of projects. These models provide a quantitative basis for decision-making, allowing project managers to optimize resource allocation, forecast potential issues, and measure project performance accurately. By incorporating AI and machine learning techniques, these models can adapt to changing conditions and provide real-time insights, making them indispensable tools for managing innovative projects.

To formalize the syncretic management process of innovative projects using AI, the following mathematical approaches can be used.

Let's look on the Core Components of Mathematical Syncretic Management Models

#### *Optimization Model.*

The optimization goal is to maximize the efficiency indicator  $E$ , which can be expressed through various project parameters:

$$\text{Max } E = f(X, R, T, C),$$

where  $X$  – completed tasks,  $R$  – resources,  $T$  – time,  $C$  – costs.



### *Risk Management Model.*

The model can use probabilistic analysis methods to assess risks:

$$P(R_i) = \frac{N_{R_i}}{N},$$

where  $P(R_i)$  – the probability of risk  $R_i$ ,  $N_{R_i}$  – number of risk  $R_i$  occurrences,  $N$  – total number of analysed cases.

### *Prediction Model Using AI.*

Using machine learning to predict key project indicators.

$$Y = W \cdot X + b,$$

where  $Y$  – predicted performance indicators,  $X$  – input data (influencing factors),  $W$  – model weights,  $b$  – bias.

The integration of mathematical models in syncretic management provides a powerful framework for managing innovative projects. These models enable precise planning, efficient resource allocation, effective risk management, and real-time performance monitoring, ensuring that projects are executed successfully in a dynamic and complex environment. As the field of AI continues to evolve, the role of mathematical models in project management will become increasingly significant, offering new opportunities for innovation and excellence.

## **Conclusion**

The framework model of syncretic management of innovative projects, incorporating AI technologies, offers a holistic and dynamic approach to project management. By integrating clear goal-setting, adaptive lifecycle management, and robust risk and resource optimization, this model ensures a comprehensive strategy for addressing the complexities of modern projects.

Key to this framework is the seamless integration of AI technologies at various project stages, enhancing automation, predictive analytics, and decision-making capabilities. This not only optimizes resource allocation but also significantly improves risk management through advanced predictive models.

Ethical and legal considerations are embedded within the framework, ensuring that AI applications are transparent, accountable, and compliant with evolving standards. This focus on ethical AI use underscores the importance of responsible innovation, fostering trust and sustainability in AI-driven projects.

Effective communication and collaboration tools are emphasized to engage all stakeholders, ensuring a cohesive and cooperative project environment. This collaborative approach leverages interdisciplinary expertise, enhancing the innovative capacity of project teams.

Mathematical models support the framework by providing formalized methods for optimization, risk management, and performance prediction. These models facilitate data-driven decision-making, further enhancing the effectiveness of project management practices.

The framework model of syncretic management of innovative projects with AI integration represents a forward-thinking, adaptable, and ethically responsible approach. It equips organizations to navigate the rapid advancements in AI, ensuring project success and sustainability in an era of unprecedented technological growth.

## REFERENCES

1. PMBOK. Guide 7<sup>th</sup> edition (2021). Project management institute.
2. A Guidebook of Program and Project Management for Enterprise Innovation” P2M. 3<sup>rd</sup> Edition (2014), Project Management Association of Japan.
3. Haefner, N., Wincent, J., Parida, V., & Gassmann, O. (2021). Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120392>
4. Lokhande, A. (2022). Use of Artificial Intelligence Smart Tools in Projects. *2022 8th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICSSS54381.2022.9782273>
5. Reim, W., Åström, J., & Eriksson, O. (2020). Implementation of Artificial Intelligence (AI): A Roadmap for Business Model Innovation. *AI*. <https://doi.org/10.3390/ai1020011>
6. Dwivedi, Y., et. al. (2019). Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy. *Int. J. Inf. Manag.*, 57, 101994. <https://doi.org/10.1016/J.IJINFOMGT.2019.08.002>
7. Bushuyev, S., Bushuyeva, N., Bushuieva, V., & Bushuiev, D. (2022). SMART intelligence models for managing innovation projects, *CEUR Workshop Proceedings* 3171 1463–1474.
8. Trach, R., & Bushuyev, S. (2020). Analysis of communication network of the construction project participants. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 29 (3), 388-396. <https://doi.org/10.22630/PNIKS.2020.29.3.33>
9. Bushuyev, S., Onyshchenko, S., Bushuyeva, N., & Bondar, A. (2021). Modelling projects portfolio structure dynamics of the organization development with a resistance of information entropy. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies* 2 293–298. <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648713>
10. Herremans, I. M., Nazari, J. A., & Mahmoudian, F. (2016). Stakeholder relationships, engagement, and sustainability reporting. *Journal of Business Ethics*, 138(3), 417-435. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2634-0>
11. Lado, A. A., Boyd, N. G., & Hanlon, S. C. (1997). Competition, cooperation, and the search for economic rents: A syncretic model. *Academy of Management Review*, 22(1), 110-141.
12. Martinez, F., Peattie, K., & Vazquez-Brust, D. (2019). Beyond win-win: A syncretic theory on corporate stakeholder engagement in sustainable development. *Business Strategy and the Environment*, 28(5), 896-908. <https://doi.org/10.1002/bse.2292>
13. Mukhuty, S., Upadhyay, A., & Rothwell, H. (2022). Strategic sustainable development of Industry 4.0 through the lens of social responsibility: The role of human resource practices. *Business Strategy and the Environment*, 31(5), 2068-2081. <https://doi.org/10.1002/bse.3008>
14. Murphy, M., Arenas, D., & Batista, J. M. (2015). Value creation in cross-sector collaborations: The roles of experience and alignment. *Journal of Business Ethics*, 130(1), 145-162. <https://doi.org/10.1007/s10551-014-2204-x>
15. Powell, M., Gillett, A., & Doherty, B. (2018). Sustainability in social enterprise: Hybrid organizing in public services. *Public Management Review*, 1-28. <https://doi.org/10.1080/14719037.2018.1438504>
16. Rey-Garcia, M., Mato-Santiso, V., & Felgueiras, A. (2020). Transitioning collaborative crosssector business models for sustainability innovation: Multilevel tension management as a dynamic capability. *Business & Society*, 60(5), 1132-1173. <https://doi.org/10.1177/0007650320949822>
17. Muntean, M. (2018). Business Intelligence Issues for Sustainability Projects. *Sustainability*, 10, 1-10. <https://doi.org/10.3390/SU10020335>

*The article was received 12.06.2024 and was accepted after revision 09.09.2024*

**С. Бушуєв, А. Івко**

## **РАМКОВА МОДЕЛЬ СИНКРЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ ІННОВАЦІЙНИХ ПРОЄКТІВ**

**Анотація.** Сучасний бізнес-ландшафт вимагає гнучкості, інновацій та бездоганної інтеграції різноманітних підходів. Традиційним методам управління проєктами часто важко адаптуватися до цього динамічного середовища. Ця стаття представляє рамкову модель синкретичного менеджменту для інноваційних проєктів. Синкретичне управління наголошує на об'єднанні різних елементів для досягнення згуртованого цілого. У цьому контексті це означає структуру, яка поєднує методології та інструменти для оптимізації результатів проєкту. Ключові компоненти включають: міждисциплінарну співпрацю, гнучкі методології, інтеграцію ІІІ. Синкретична модель управління пропонує кілька переваг: розширені інновації, підвищена ефективність, підвищена адаптивність. Зменшені ризики: аналіз даних від штучного інтелекту сприяє проактивному виявленню ризиків і стратегіям пом'якшення. Стаття містить стислий огляд синкретичної моделі управління інноваційними проєктами. У наступних розділах більш детально розглядатимуться основні компоненти цієї структури, розглядатимуться її практичні застосування та обговорюватимуться потенційні проблеми та міркування щодо успішного впровадження.

**Ключові слова:** синкретичне управління, інноваційні проєкти, рамкова модель, гнучка методологія.

*Стаття надійшла до редакції 12.06.2024 і прийнята до друку після рецензування 09.09.2024*

### **Бушуєв Сергій**

д.т.н., професор, завідувач кафедри управління проєктами, Київський національний університет будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7815-8129>

### **Івко Андрій**

к.т.н., докторант кафедри управління проєктами, Київський національний університет будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3388-8355>

UDC 504 ; 627.512 + 004.942

**Dmytro Stefanyshyn**, D. S. (Engineering), Senior Research Scientist  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-1613> **e-mail:** [d.v.stefanyshyn@gmail.com](mailto:d.v.stefanyshyn@gmail.com)

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

## **FORECASTING THE DESIGN MAXIMA WATER DISCHARGES OF FLOODS ON THE LATORICA RIVER ACCORDING TO THE DATA OF THE MUKACHEVO GAUGING STATION USING PLOTTING POSITION FORMULAS**

**Abstract.** *This article presents the results of forecasting design maxima discharges on the Latorica River within Mukachevo town based on hydrological observation data at the “Mukachevo” gauging station using plotting position formulas. While solving the task, a novel non-parametric method of forecasting using observation data is applied. The method includes extrapolating the discrepancy (divergence, disagreement) between the estimates of the statistical annual probabilities of exceedance obtained by different plotting position formulas. The task is considered in the frame of the stationarity hypothesis of the maximum river flow employing a time series of maximal discharges of the Latorica River observed at the “Mukachevo” gauging station from 1947 to 1999.*

*We involved the thirteen plotting position formulas. There was no specific criterion for choosing them to solve the task. All applied formulas were considered admissible options, and results obtained after using them – expert judgments reflecting decision-makers’ predisposition to more cautious or less expensive decision options in flood management strategies.*

*The epistemic uncertainty of the different plotting positions was reduced by employing the Fishburn rule. According to this rule, the significance of various plotting positions was given by arranging their estimates in descending order of importance of their values under decision-making. Depending on the selected significance option assignment of the different plotting position formulas, such rank-weighted estimates of the design peak discharges (each of them for annual exceedance probability 1%, 0.5%, and 0.2%) were computed: (1) the rank-weighted upper bound estimate (sup-estimate) corresponding to the predisposition to more cautious decision options; (2) the rank-weighted lower bound estimate (inf-estimate) corresponding to the predisposition to less expensive decision options. As possible control theoretical alternatives for forecasting design maximal discharges considered were five parametric probability distributions: 1) the Kritskyi-Menkel three-parameter gamma distribution; 2) Pearson’s type III distribution; 3) the Extreme value type I distribution (Gumbell’s type I distribution); 4) the Logarithmic Pearson type III distribution; and 5) the Two-parameters logarithmic-normal distribution. The population statistical parameters for these parametric probability distributions were estimated from the sample statistics by the method of moments.*

**Keywords:** *Annual exceedance probability, design maxima discharge, epistemic uncertainty, extrapolation, flood, forecasting, observation data, parametric probability distributions, plotting position formulas, rank-weighted estimates.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.123-140>

## 1. Introduction

Riverine floods are among the essential natural hazards threatening human life and activity in Ukraine. In terms of frequency, area of distribution, and losses, they outweigh any natural disasters, including storms, earthquakes, heat waves, landslides, droughts, forest fires, etc. According to national natural hazard statistics for 1980-2020, floods caused more than 34% of annual natural hazard occurrences in the country [1]. Floods threaten more than 27 per cent of the country's territory and about a third of Ukraine's population lives in flood-prone areas [1-3].

Most often, disastrous floods occur in the western regions of Ukraine. Namely, the basins of the Ukrainian Carpathian Rivers form one of the most flood-prone regions in Europe and the world [4, 5], and disastrous floods in the Tisza, Dniester, Prut, and Siret Rivers' basins seem to be common natural phenomena [6].

The region that especially suffers from river floods in Ukraine is Transcarpathia. The region is located within the south-western slopes and foothills of the Ukrainian Carpathian Mountains (Fig. 1), which cover around 80% of its area. Transcarpathia has the densest river network in Ukraine. According to [4, 7-9], the region has the highest risk of catastrophic floods in Ukraine.

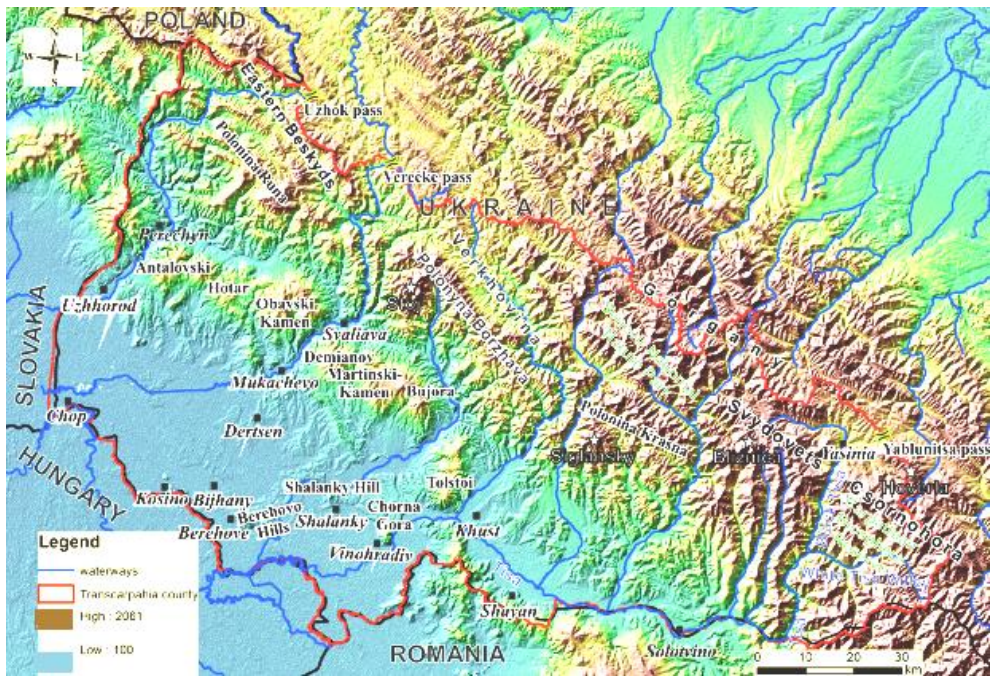


Fig. 1. Topographical sketch of Transcarpathia Digital Elevation model: SRTM 1 arc sec (<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>) (Taken from [10])

One of the most destructive floods in Ukrainian Transcarpathia, which caused significant damage to the region, occurred in November 1998 [4, 11]. The snowmelt and rain by origin flood exceeded all previous floods in this region in water level height rise and consequences of flooding. Because of the snow-melting and intensive rains, the Tisza, Tereblya, Teresva, Uzh, Borzhava, Latorica and other rivers burst their banks, flooding almost 120 settlements. Nearly 350,000 people, around a third

of the region's population, were in the disaster zone. In particular, the town of Mukachevo (Fig. 2), through which the Latorica River flows (Fig. 3), was seriously affected too. Almost 80 per cent of the town territory was submerged. As you can see below in the photo, Fig. 4(a), the water level rose to the bridge in the town centre. The level continued to grow. In a matter of hours, Latorica, which divides the town into two halves, left its banks.



Fig. 2. View the Mukachevo town and Latorica River from the Palanok Castle, May 2012 (Author's photo)



Fig. 3. River Latorica, May 2012. Right – Monument to victims of the flood “1998. Year of trouble and trials” (Author's photo)

Heavy floods on Latorica, which threaten the town of Mukachevo, with more than 85,000 inhabitants, occur almost annually (See, for example, Fig. 4(b)) [8, 9, 12]. The Latorica and Uzh Rivers form the so-called Transcarpathian Sub-river Basin Area characterised by heavy floods. Around 1.2 million people live within this area, where climate-soil conditions of the lowland favour the development of agriculture [13]. They live under constant flood threat. Today, the region's only physical

protection against floods is provided with dikes and levees [14], not all of which stand in condition to correspond to realities and modern requirements. In particular, in [14], there is no information on design discharges for many of these structures, for example, for the dikes on Latorica within Mukachevo (See Table 1).



Fig. 4. Flooding cases in Mukachevo: (a) November 1998 (<https://www.mukachevo.net/ua/news/view/186143>); (b) May 2019 (<https://www.rbc.ua/ukr/styler/zhutkoe-navodnenie-zakarpate-pokazali-vyso-ty-1558682813.html>)

Table 1. Dikes within Ukraine in the Latorica River (Taken from [14])

No.	Dike name	Locality name	Length (m)	YFO <sup>1</sup>	AEP <sup>2</sup>	CCS <sup>3</sup>
1	Right bank dike Latorica river	Vinkovo	27,840	1939	5%	M
2	Left bank dike Latorica river	Solomonovo	21,900	1967	1%	B
3	Left bank dike Latorica river	Chomonym	20,900	1939	5%	M
4	Right bank dike Latorica river	Palad Komarivtsi	17,600	1967	1%	B
5	Left bank dike Latorica river (from the Sadova-Monastery Bridge to railway bridge)	Mukachevo	6,855	?	?	M
6	Left bank dike Latorica river (from the railway bridge to the road bridge)	Mukachevo	6,855	?	?	M
7	Right bank dike Latorica river (from the Sadova-Monastery Bridge)	Mukachevo	5,013	?	?	M
8	Left bank dike Latorica river	Bystrytsa	2,450	1948	5%	M
9	Right bank dike Latorica river	Kolchyno	1,600	1936	5%	M

<sup>1</sup>YFO – Year of function into operation

<sup>2</sup>AEP – Annual Exceedance Probability (year<sup>-1</sup>, %) of design peak discharge of flood

<sup>3</sup>CCS – Current Condition Status: G – good, M – moderate, B – bad

As of 2010, there were eight hydrological gauging stations (HS) in the Latorica basin [15], four of them – on the Latorica River: in Pidpolozzia, Svaliava, Mukachevo, and Chop. In the HS “Pidpolozzia” and “Mukachevo”, hydrological observations of peak discharges of floods have been carried out since 1947; in the HS “Chop” – since 1957, and in the HS “Svaliava” – since 1962. However, the hydrological risks relating to floods on the Latorica River have not been explored enough within Ukraine.

## **2. The case study and the purpose of this paper**

Latorica is a river belonging to the watershed of the Danube. It is one of the longest rivers in the Transcarpathians. The Latorica River flows from Ukraine into Slovakia, confluent with the Ondava River in Zemplín, within Slovakia, and gives rise to the Bodrog River, itself a tributary of the Tisza River, which flows into the Danube River. The total length of the Latorica River is around 190 km. The river flows about 156 km within Ukrainian territory, the rest – in Slovakia. Its source is in the Ukrainian Carpathians (Eastern Carpathian Mountains), near the Latirka village, at an altitude of about 800 m. The total river drop is 703 m, and the average slope is 3.7‰ [15, 16]. It flows the Svaliava, Mukachevo, Solomonovo, and Chop towns in Ukraine, and the Veľké Kapušany town – in Slovakia. Its basin size is around 7,740 km<sup>2</sup>.

Latorica forms a unique landscape of oxbow lakes, soft and hardwood floodplain forests, grasslands, and meadows. The river valley is an important migration corridor supporting the natural biodiversity, a habitat for rare and threatened bird species, including other endemic species' biodiversity hotspots, particularly, indigenous fish species [10, 17]. The Latorica River is also applied to meet different water needs – in drinking and industrial water supply, irrigation, recreation, fish farming etc [16].

The nature of Latorica along its flow is very variable. From its source to the town of Svalyava, the river is a mountainous character. In Mukachevo, Latorica turns into a slow-flowing river. They say Mukachevo owes its origins to the river. In ancient times, there was a big mill on Latorica. Initially, the town was mainly developing on the left bank of the river. Today, Latorica divides Mukachevo on the right bank part (the central part) and the left bank part. The town is protected by three dikes, totalling 18,723 m (See above Table 1). However, we do not know how reliable these structures are and against which floods they can protect the town's residents. Also, we are unaware of what design discharges of floods should be discussed to reconstruct the dikes.

This study's purpose was to discover the epistemic uncertainty in forecasting design maxima discharges of the Latorica River using observation data to open the discussion regarding the reconstruction of the flood-protected dikes in Muchachevo. The article presents the preliminary results of forecasting design maxima discharges in the Latorica River within Mukachevo town based on hydrological observation data at the “Mukachevo” gauging station using plotting position formulas. Considered were thirteen plotting position formulas. In order to minimise the epistemic uncertainty of the plotting positions' options, the Fishburn rule was used. Depending on the selected significance option assignment of the different plotting position formulas, such rank-weighted estimates of the design peak discharges (each of them for annual exceedance probability 1%, 0.5%, and 0.2%) were computed:



(1) the rank-weighted upper bound estimate (sup-estimate) corresponding to the predisposition to more cautious decision options; (2) the rank-weighted lower bound estimate (inf-estimate) corresponding to the predisposition to less expensive decision options.

### 3. Data, materials, assumptions, and techniques used in the study

The study employs a fragment of the time series of maximal discharges of the Latorica River, which were observed at the hydrological station (HS) “Mukachevo” from 1947 to 1999 (Fig. 5). The data were taken from the Hydrological Yearbooks [18].

The data sample length is 53 years. The maximum observed peak discharge value within the data sample is 1630 m<sup>3</sup>/s (in 1980), and the minimum value is 114 m<sup>3</sup>/s (in 1961). Four outliers of peak discharges that exceeded 827 m<sup>3</sup>/s (in 1968) were observed: 1480 m<sup>3</sup>/s in 1957, 1630 m<sup>3</sup>/s in 1980, 1300 m<sup>3</sup>/s in 1981, and 1310 m<sup>3</sup>/s in 1998. The mean peak discharge within the data sample is 525 m<sup>3</sup>/s; the sample standard deviation – of 326 m<sup>3</sup>/s. The coefficient of variation of the time series  $C_V$  is 0.62, the skewness  $C_S$  is 1.62, and the  $C_S / C_V$  is 2.60.

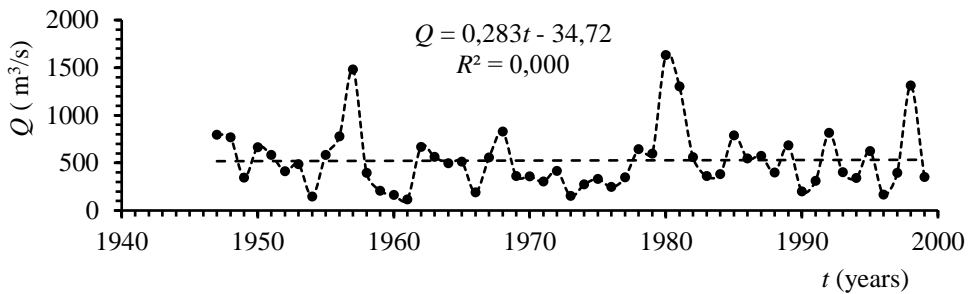


Fig. 5. Time series of annual maximum water discharges, the Latorica River, the “Mukachevo” gauging station, the data sample of 1947-1999

We used two well-known flood frequency analysis techniques to discover the epistemic uncertainty in forecasting design water discharges based on observational data. The first technique is parametric by applying probability distribution functions. The second technique is non-parametric by using plotting position formulas. Two assumptions were applied. The first was a true (the best, an optimal etc) discharge maxima probability distribution would remain unknown [19]. The second was that choosing a plotting position formula among possible options to examine the adequacy of alternative parametric probability distributions can be arbitrary [20].

Admittedly, various parametric probability distributions, independently of techniques of assessing their parameters, can fit observed annual maximum discharges practically equally [19, 21-23]. Correspondingly, any of them might be considered a permissible hypothesis for design peak discharge forecasting [22]. In confirmation of this, let us mention that the national standards of different countries in the world propose for frequency analysis of maximum peak discharges of floods to use various probability distribution function types [24, 25]. However, as practice shows, they can forecast nonsimilar peak discharges with a chosen annual exceedance probability. The same forecasted discharge can have different values of

exceedance probabilities depending on the distributions used [21-23]. In turn, similar to forecasting results using different probability distributions, the results of calculating empirical probabilities of exceedance observed maxima water discharges show an increase in the disagreement between the estimates obtained using the different plotting position formulas in case of more extreme events. So, we have to consider both a family of parametric distributions and a family plotting position formulas to shed light on possible estimates and check how substantive the forecasting uncertainty could be.

In this study, we applied thirteen plotting position formulas (Table 2). They appear in the hydrological literature most commonly. We arranged them from the least plot position (Hazen’s formula) for the most observed peak discharge to the most plot position (according to the Weibull formula).

Table 2. Plotting position formulas used in the study

No	Author (year)	Formula to calculate $P_m$ (1/year)*	References
1	Hazen (1914)	$\frac{m - 0.5}{n}$	[20, 26, 27, 29, 30]
2	Gringorten (1963)	$\frac{m - 0.44}{n + 0.12}$	[20, 26, 28, 27, 29, 30]
3	Nguyen et al. (1989)	$\frac{m - 0.42}{n + 0.3C_S + 0.05}$ , $C_S$ is skewness	[28, 30]
4	Cunnane (1978)	$\frac{m - 0.4}{n + 0.2}$	[27, 28, 29, 30]
5	Blom (1954)	$\frac{m - 3/8}{n + 1/4}$	[20, 27, 29, 30]
6	Hosking (1990)	$\frac{m - 0.35}{n}$	[28, 30]
7	Tukey (1962)	$\frac{m - 1/3}{n + 1/3}$	[27, 29, 30]
8	Goel (1993)	$\frac{m - 0.02C_S - 0.32}{n - 0.04C_S + 0.36}$	[28, 30]
9	Beard (1945)	$\frac{m - 0.3175}{n + 0.365}$	[20, 26, 27, 29, 30]
10	Kim et al. (2012)	$\frac{m - 0.32}{n + 0.0149C_S^2 - 0.1364C_S + 0.3225}$	[28, 30]
11	Chegodaev (1965)	$\frac{m - 0.3}{n + 0.4}$	[27, 30]
12	Adamowski (1985)	$\frac{m - 0.25}{n + 0.5}$	[27, 29, 30]
13	Weibull (1939)	$\frac{m}{n + 1}$	[20, 26, 27, 28, 29, 30]

\*  $P_m$  is the empirical exceedance probability of the  $m$ -th order observed value,  $m$  is the rank of the value, where the highest one being “1”, and  $n$  is the number of observed statistics.

As possible theoretical alternatives for forecasting design peak discharges of 1%, 0.5%, and 0.2% annual exceedance probabilities considered were five parametric probability distributions: 1) the Kritskyi-Menkel three-parameter gamma distribution (KM3) ( $C_V = 0.62$ ,  $C_S = 3 C_V$ ); 2) Pearson's type III distribution (P3) ( $C_S = 1.62$ ); 3) the Extreme value type I (Gumbell's type I) distribution (EV1); 4) the Logarithmic Pearson type III distribution (LP3) ( $C_S = -0.11$ ); and 5) the Two-parameters log-normal distribution (LN2). Results of forecasting are shown below in Fig. 6 and Table 3. Fig. 6 also shows Weibull's and Hazen's plot positions for observed peak discharges.

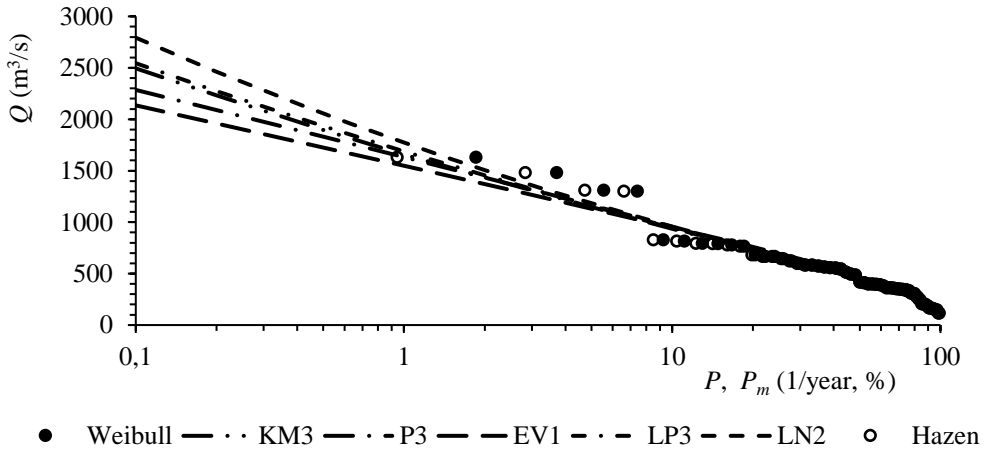


Fig. 6. Alternative parametric probability distributions of annual maxima discharges of the Latorica River, the HS “Mukachevo”, the data sample of 1947-1999;  $P$  and  $P_m$  are forecasted and empirical annual exceedance probabilities

Table 3. Results of alternative forecasting the design maxima discharges of 1%, 0.5%, and 0.2% annual exceedance probabilities for the Latorica River, the HS “Mukachevo”, using parametric probability distributions

Probability distribution	$P$ (1/year, %)		
	0.2	0.5	1.0
Two-parameters log-normal distribution (LN2)	2462	2056	1772
Logarithmic Pearson type III distribution (LP3)	2274	1933	1688
Kritskyi-Menkel's three-parameter gamma distribution (KM3)	2232	1897	1657
Pearson's type III distribution (P3)	2091	1831	1634
Gumbell's type I distribution (EV1)	1959	1725	1548

The population statistical parameters for the alternative parametric probability distributions KM3, P3, EV1, LP3, and LN2 (Fig. 6) were estimated from the sample statistics by the moments' method by equating the sample characteristics to the population parameters.

## 4. The forecasting method used in the study

### 4.1. Some preliminary remarks about the method being used

While solving the task, a novel non-parametric method of forecasting based on observation data was applied, which was the author's development [30, 31]. This method includes extrapolating the discrepancy (divergence, disagreement) between the estimates of the statistical annual probabilities of exceedance obtained using different plotting position formulas.

Previous research [30, 31] discovered that different plotting position formulas provide similar results for high probable events with return periods  $T_{r,m}$  of 5 years and less or the annual exceedance probabilities  $P_m$  of 20% and more, where  $T_{r,m} = 1/P_m$ , or  $T_{r,m} = 100/P_m$  if  $P_m$  is calculated as percentages. However, the disagreement between probabilities tends to increase while enlarging the modelling horizon towards low probable (more extreme) events. The same conclusion relates to alternative parametric probability distributions (See above Fig. 6).

As a disagreement metric between empirical probabilities obtained using different plotting position formulas, proposed indicator  $d_m$ , namely:

$$d_m = \frac{P_{m,i}}{P_{m,j}}, \text{ or } d_m = \frac{T_{r,m,j}}{T_{r,m,i}}, i \neq j, \quad (1)$$

where  $P_{m,i}$  and  $P_{m,j}$  are the empirical annual exceedance probabilities (plot positions), and  $T_{r,m,i}$ ,  $T_{r,m,j}$  are return periods of the observed maximal discharges, calculated using the  $i$ -th and  $j$ -th counterparty plotting position formulas, which provide  $P_{m,i} > P_{m,j}$ ,  $T_{r,m,i} < T_{r,m,j}$ , and  $d_m > 1$ ,  $m$  is a rank of a maxima water discharge value where the highest one has the rank  $m = 1$ .

In the next step [30, 31], we have studied the possibility of modelling such kind of regression dependencies relating to the disagreement indicator  $d_m$ : (1) between the return periods  $T_{r,m,i}$ ,  $T_{r,m,j}$  calculated using  $i$ -th and  $j$ -th counterparty plotting position formulas and the indicator  $d_m$ ,  $d_{m,i} = f(T_{r,m,i})$ ,  $d_{m,j} = f(T_{r,m,j})$ ; (2) between the observed peak discharges  $Q_m$  and the indicator  $d_m$ ,  $d_m = f(Q_m)$ . Thus, by estimating the indicator  $d_m$  and building the before-mentioned regressions, we can make forecasting by applying extrapolation.

### 4.2. Applying the Fishburn rule to reduce the epistemic uncertainty of using various plotting position formulas

In the study, the results of using different plotting position formulas are considered expert judgments, which may have different importance in decision-making [30, 31]. For instance, Weibull's plotting positions may contribute to choosing more cautious decision options among alternative flood management strategies. However, such options can be associated with increasing capital costs. Hazen's plotting position

estimates may contribute to choosing cheaper decision options, but the risk of flood losses increases.

Thus, when making decisions, we can consider different plotting position formulas as indicators of the predisposition to more cautious or less expensive decision options. In other words, various plotting position estimates obtained using different plotting position formulas can acquire their weight level in a system of indicators' importance under the decision-making process [30, 31].

In the method, the corresponding "weights"  $w_i$  for the  $i$ -th plotting position estimates  $P_{m,i}$   $i = \overline{1, k}$  according to the Fishburn rule [32, 33] will be:

$$w_i = \frac{2(k - i + 1)}{(k + 1) \cdot k}, \quad (2)$$

where  $i$  is the rank of the  $i$ -th plotting position estimate obtained using the  $i$ -th formula taking into account the level of the formula importance; the highest estimate gets the rank  $i = 1$  when there is a predisposition to more cautious options, and vice-versa, when there is a predisposition to options with lower capital costs, the smallest one has the rank  $i = k$ ;  $k$  is the total number of the ranked-set plotting position estimates (formulas) ( $k = 13$ , See Table 2).

Accordingly, depending on the selected significance option of the different plotting position formulas the rank-weighted estimate of the plotting position probability

$$P_{m,w} = \sum_{i=1}^k P_{m,i} \cdot w_i, \quad (3)$$

where  $m$  is the rank of the observed peak water discharge  $Q_m$ .

## 5. Results of the study

For the total number of the used expert estimates (formulas)  $k = 13$ , the following weights of the  $i$ -th different plotting position estimates (formulas) were obtained depending on their rank of importance: ( $i = 1$ ,  $w_1 = 0.143$ ); (2, 0.132); (3, 0.121); (4, 0.110); (5, 0.099); (6, 0.088); (7, 0.077); (8, 0.066); (9, 0.055); (10, 0.044); (11, 0.033); (12, 0.022); ( $i = 13$ ,  $w_{13} = 0.011$ ). Depending on the selected significance option of the different plotting position formulas, the Fishburn rule enabled us to get two rank-weighted estimates for the considered annual plotting position probabilities  $P_{m,w}$ : the rank-weighted upper bound estimates (sup)  $P_{m,w}^{\text{sup}}$ ; the rank-weighted lower bound estimates (inf)  $P_{m,w}^{\text{inf}}$ . Accordingly, for the Latorica River, the HS "Mukachevo", two grades for each possible rank-weighted estimate of the maxima discharges of 1%, 0.5%, and 0.2% annual exceedance probability using the non-parametric method have been forecasted: the lower bound ("inf") and the upper bound ("sup") estimates of design peak discharges. The results are presented in Tables 4-6 and Figures 7, 8.

Table 4 presents empirical exceedance probabilities  $P_m$  of the  $m$ -th order observed peak discharges of the Latorica River, the HS “Mukachevo”, the data sample of 1947-1999,  $m = \overline{1,8}$ , depending on the different plotting position formulas. Table 5 shows estimates  $P_{m,w}^{\text{sup}}$ ,  $P_{m,w}^{\text{inf}}$  of  $P_m$ , the indicator  $d_m = P_{m,w}^{\text{sup}}/P_{m,w}^{\text{inf}}$ , and the return periods  $T_{r,m}^{\text{sup}} = 100/P_{m,w}^{\text{sup}}$ ,  $T_{r,m}^{\text{inf}} = 100/P_{m,w}^{\text{inf}}$ .

Table 4. Exceedance probabilities  $P_m$  for the observed peak discharges with ranks  $m = \overline{1,8}$  depending on the different plotting position formulas

No	Plotting position formula (author)	$P_m$ (1/year, %), $m = \overline{1,8}$ , $Q_m$ (m <sup>3</sup> /s)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		1630	1480	1310	1300	827	813	794	788
1	Hazen	0,94	2.83	4.72	6.60	8.49	10.38	12.26	14.15
2	Gringorten	1.05	2.94	4.82	6.70	8.58	10.47	12.35	14.23
3	Nguyen et al.	1.08	2.95	4.82	6.69	8.56	10.42	12.29	14.16
4	Cunnane	1.13	3.01	4.89	6.77	8.65	10.53	12.41	14.29
5	Blom	1.17	3.05	4.93	6.81	8.69	10.56	12.44	14.32
6	Hosking	1.23	3.11	5.00	6.89	8.77	10.66	12.55	14.43
7	Tukey	1.25	3.13	5.00	6.88	8.75	10.63	12.50	14.38
8	Goel	1.22	3.09	4.97	6.84	8.72	10.60	12.47	14.35
9	Beard	1.28	3.15	5.03	6.90	8.77	10.65	12.52	14.40
10	Kim et al.	1.28	3.16	5.04	6.92	8.81	10.69	12.57	14.45
11	Chegodav	1.31	3.18	5.06	6.93	8.80	10.67	12.55	14.42
12	Adamowski	1.40	3.27	5.14	7.01	8.88	10.75	12.62	14.49
13	Weibull	1.85	3.70	5.56	7.41	9.26	11.11	12.96	14.81

Table 5. The estimates  $P_{m,w}^{\text{sup}}$ ,  $P_{m,w}^{\text{inf}}$ ,  $d_m$ ,  $T_{r,m}^{\text{sup}}$ ,  $T_{r,m}^{\text{inf}}$  depending on the  $m$ -th order's peak discharges

Parameters	Observed peak discharge $Q$ (m <sup>3</sup> /s)							
	1630	1480	1310	1300	827	813	794	788
$m$	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{m,w}^{\text{sup}}$ (%)	1,34	3,22	5,09	6,96	8,83	10,71	12,58	14,45
$P_{m,w}^{\text{inf}}$ (%)	1,15	3,03	4,91	6,78	8,66	10,54	12,42	14,30
$d_m$	1,168	1,062	1,037	1,026	1,020	1,016	1,013	1,011
$T_{r,m}^{\text{sup}}$ (years)	74	31	20	14	11	9	8	7
$T_{r,m}^{\text{inf}}$ (years)	87	33	20	15	12	9	8	7

Fig. 7 and Table 6 present the results of forecasting the peak discharges of 1%, 0.5%, and 0.2% annual exceedance probability for the Latorica River, the HS “Mukachevo”, carried out according to the data shown in Table 5.

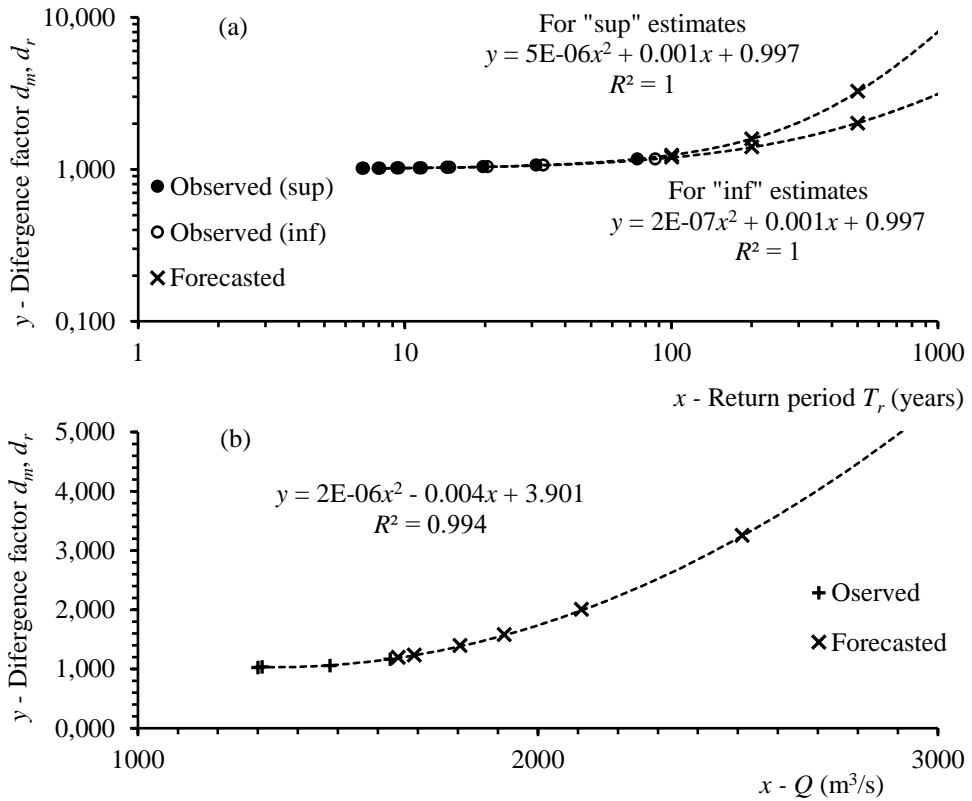


Fig. 7. Forecasting the peak discharges of 1%, 0.5%, and 0.2% annual exceedance probability for the Latorica River, the HS “Mukachevo”, by extrapolating the regressions  $d_{m,i} = f(T_{r,m,i})$ ,  $d_{m,j} = f(T_{r,m,j})$  (a), and the regression  $d_m = f(Q_m)$  (b)

Table 6. The results of forecasting the peak discharges of 1%, 0.5%, and 0.2% annual exceedance probability for the Latorica River, the HS “Mukachevo”

$P$ (1/year, %)	$T_r = 100 \cdot P^{-1}$ (years)	Design maxima discharge $Q$ (m <sup>3</sup> /s) :	
		estimate “inf”	estimate “sup”
1	100	1650	1690
0.5	200	1805	1915
0.2	500	2108	2510

Finally, Fig. 8 shows the visualisation of the forecasted peak discharges (Table 6) obtained using the discussed non-parametric method in comparison with the plots giving the chosen alternative parametric probability distributions.

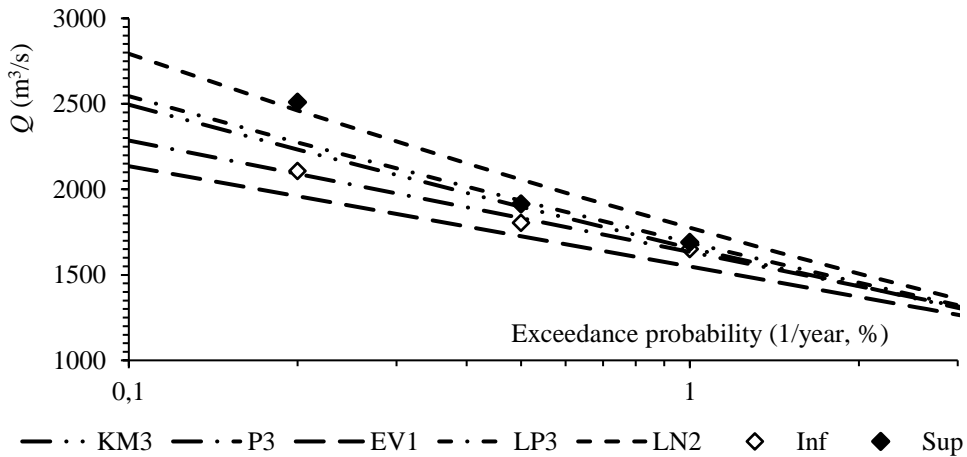


Fig. 8. The visualisation of the forecasted peak discharges (estimates “inf” and “sup”) of 1%, 0.5%, and 0.2% annual exceedance probability for the Latorica River, the HS “Mukachevo”, obtained using the discussed method in comparison with plots of the chosen alternative parametric probability distributions

In the considered case (the Latorica River, the HS “Mukachevo”), it should be noted the nice goodness of fit of the lower bound (“inf”) estimates of the forecasted peak discharges of 1%, 0.5%, and 0.2% annual exceedance probability obtained by applying the non-parametric method to the proper forecasts by the Pearson type III distribution (P3). We have 1650 m<sup>3</sup>/s, 1805, and 2108 m<sup>3</sup>/s (See Table 6) opposite to 1634 m<sup>3</sup>/s, 1831, and 2091 m<sup>3</sup>/s (See Table 3). The estimates differ by 1.0, 1.45, and 0.82%. The upper bound (“sup”) estimates of the 1%, 0.5% exceedance probability peak discharges forecasted by applying the non-parametric method correspond better to the Logarithmic Pearson type III distribution (LP3). We have 1690 opposite 1688 m<sup>3</sup>/s and 1915 opposite 1933 m<sup>3</sup>/s. The estimates differ by 0.14 and 0.94%. However, the upper bound (“sup”) estimate of the 0.2% exceedance probability peak discharge forecasted by applying the non-parametric method corresponds better to the Two-parameters logarithmic-normal distribution (LN2). We have 2510 opposite 2462 m<sup>3</sup>/s. The estimates differ by 1.95%.

## 6. Some discussion remarks

There are a lot of parametric probability distributions to forecast peak discharges of floods based on observation data [19, 24, 25], including proper techniques to assess the distribution parameters [23]. As practice shows, different probability distributions can forecast various peak discharges of a chosen annual exceedance probability [19, 21-25]. Accordingly, depending on the chosen distributions, the same forecasted peak discharge can have different exceedance probabilities.

Moreover, we can apply different plotting position formulas to fit parametric probability distributions with the observed data (Table 2). The issue is the choice of an unbiased empirical formula to plot the observed data [20]. Any plotting position formula can be an option for fitting parametric probability distributions.

This is because there are two basic kinds of uncertainty relating to hydrological forecasting: natural (or stochastic) and epistemic (non-stochastic or model) uncertainty. The stochastic uncertainty relates to the issue that available data are



always insufficient to define the probabilities of extreme events more precisely, independently of the forecasting way – parametric one by applying probability distributions or non-parametric one – based on plotting position formulas. In addition, the epistemic uncertainty related to the incomplete knowledge about the river runoff phenomenon [19] will remain a serious challenge despite the data volumes, their variety, veracity and monitoring scopes [32].

Possibly, just the multi-model approach to forecasting by applying alternative techniques and probabilistic models will promote revealing epistemic uncertainty of peak discharges' forecasts. At least, considering both a family of parametric distributions and a family of plotting position formulas can shed light on the spread of estimates to check how substantive the forecasting uncertainty could be in various cases. Based on a multi-model approach, the non-parametric, numerically analytical method, which is based on extrapolating the discrepancy (divergence, disagreement) between the estimates of the statistical annual exceedance probabilities obtained by applying different plotting position formulas, might improve forecasting of peak discharges of floods using observed data. It is also worth noting, in terms of forecast quality and accuracy, the estimates of the design peak discharges of the Latorica River, the HS “Mukachevo”, obtained by applying the non-parametric technique, do not principally differ from similar estimates obtained using the selected parametric probability distributions.

## Conclusions

1. Some preliminary results of forecasting design peak discharges of floods of the Latorica River, the “Mukachevo” gauging station are presented. While solving the task, a novel non-parametric technique of forecasting based on observation data was applied, which is based on extrapolating the discrepancy (divergence, disagreement) between the statistical annual exceedance probabilities obtained using plotting position formulas. The task was considered in the frame of the stationarity hypothesis of the maximum river flow employing a time series of maximal discharges of the Latorica River observed at the “Mukachevo” gauging station from 1947 to 1999.

2. The main purpose of this study was to discover the epistemic uncertainty in forecasting design discharges of the Latorica River using observation data to open the discussion relating to the reconstruction of the flood-protected dikes in Muchachevo, the Transcarpathia region. Depending on the selected significance option of the applying plotting position formulas, two rank-weighted estimates of the design peak discharges (each of them for annual exceedance probability 1%, 0.5%, and 0.2%) were computed: (1) the rank-weighted upper bound estimates (sup-estimates) corresponding to the predisposition to more cautious decision options; (2) the rank-weighted lower bound estimates (inf-estimates) corresponding to the predisposition to less expensive decision options. As possible control theoretical alternatives for forecasting design maximal discharges considered were five parametric probability distributions: 1) the Kritskyi-Menkel three-parameter gamma distribution; 2) Pearson's type III distribution; 3) the Extreme value type I distribution (Gumbell's type I distribution); 4) the Logarithmic Pearson type III distribution; and 5) the Two-parameters logarithmic-normal distribution.

3. Among the practically significant results of the study, the following ones should be highlighted. There was revealed nice goodness of fit of the lower bound (“inf”) estimates of the forecasted peak discharges of 1%, 0.5%, and 0.2% annual

exceedance probability obtained by applying the non-parametric method to the proper forecasts by the Pearson type III distribution (P3), namely: the discharges of 1650 m<sup>3</sup>/s, 1805, and 2108 m<sup>3</sup>/s opposite to the discharges of 1634 m<sup>3</sup>/s, 1831, and 2091 m<sup>3</sup>/s. The estimates differ by 1.0, 1.45, and 0.82%. The upper bound (“sup”) estimates of the 1%, 0.5% exceedance probability peak discharges forecasted by applying the non-parametric method correspond better to the Logarithmic Pearson type III distribution (LP3). The estimates are 1690 m<sup>3</sup>/s opposite 1688 m<sup>3</sup>/s and 1915 m<sup>3</sup>/s opposite 1933 m<sup>3</sup>/s and differ by 0.14, 0.94%, correspondingly. Finally, the upper bound (“sup”) estimate of the 0.2% exceedance probability peak discharge forecasted by applying the non-parametric method corresponds better to the Two-parameters logarithmic-normal distribution (LN2): 2510 m<sup>3</sup>/s opposite 2462 m<sup>3</sup>/s. The estimates differ by 1.95%.

## REFERENCES

1. Ukraine – Vulnerability. Climate Change Knowledge Portal. Available from <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/ukraine/vulnerability>.
2. Flood protection of territories. United Nations Development Programme. UNDP in Ukraine. Available from <https://www1.undp.org/content/dam/ukraine/docs/EE/Flood>.
3. Stefanyshyn, D.V. (2022). What could we have learnt from the previous flood data to predict losses caused by the 1980, 1986, and 1998 catastrophic floods in Ukrainian Transcarpathian? *Environmental safety and natural resources*, 43(3), 81–109; <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.81-109>.
4. Stoyko, S.M. (2002). The causes of catastrophic floods in the Transcarpathian region and the system of ecological prophylactic measures for their prevention. TISCIA monograph series, 6, 17–28.
5. Lukianets, O., Malyska, L., and Moskalenko, S. (2020). Maximum Riverine Runoff in the Basin of Tysa and Prut within Ukraine. In: *Proceedings of the XXVIII Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management* (Kyiv, November 6-8, 2019). Edited by V. Osadchiy, et al. Kyiv, Nika-Tsentr; DOI:10.15407/uhmi.conference.01.18, Corpus ID: 228979870.
6. Didovets, I., Lobanova, A., Bronstert, A., Snizhko, S, Fox Maule, C, and Krysanova, V. (2017). Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Three Representative Ukrainian Catchments Using Eco-Hydrological Modelling. *Water*, 9, 204; doi:10.3390/w9030204.
7. Susidko, M.M., and Lukyanets, O.I. (2004). Zoning of the territory of Ukraine according to the degree of hydrological danger. *UkrNDGMI*, Issue 253, 196–204. (In Ukrainian) [Сусідко М.М., Лук’янець, О.І. (2004). Районування території України за ступенем гідрологічної небезпеки. *УкрНДГМІ*, Вип. 253, 196–204].
8. Sub-Basin Level Flood Action Plan for Tisza River Basin. (2009). Int. Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR), Flood Protection Expert Group, 52 p. Available from [https://www.icpdr.org/main/sites/default/files/FAP09\\_Tisza.pdf](https://www.icpdr.org/main/sites/default/files/FAP09_Tisza.pdf).
9. Lukianets, O., Moskalenko, S. (2019). Generalization and multi-annual variability of the maximum annual runoff river water in accordance with the hydrographic zoning of Ukraine. *Hidrolohiiia, hidrokhimiiia i hidroekolohiiia*, № 2 (53), 6–20. (In Ukrainian) [Лук’янець, О.І., Москаленко, С.О. (2019). Узагальнення та багаторічна мінливість максимального річного стоку води річок відповідно до гідрографічного районування України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, Т. 2 (53), 6–20].
10. Gönczy, S., Fodor, G., Oláh, N., Nagy, T., Ésik, Z., and Szepesi, J. (2020). Geoheritage Values of the Northeastern Carpathians, Transcarpathia, Ukraine. *Geoconservation Research*, Vol. 3, Issue 2, 32–48; DOI: 10.30486/gcr.2020.1904340.1026.

11. Kirilyuk, M.I. (2001). Regime of formation of historical floods in the Ukrainian Carpathians. Environmental aspects of the formation of small rivers (problem analysis). Hydrology, hydrochemistry and hydroecology. [Resp. ed. V.K., Khilchevsky]. Kyiv, Nika-Center, Vol. 2, 146–156. (In Ukrainian) [Кирилюк, М.І. (2001). Режим формування історичних паводків в Українських Карпатах. Екологічні аспекти русло формування малих річок (аналіз проблеми). Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. [Відп. ред. В.К. Хільчевський]. Київ, Ніка-Центр, Т. 2, 146–156].
12. Konovalenko, O.S. (2016). Latorica. Encyclopedia of Modern Ukraine. Ed.: I.M. Dzyuba, A.I. Zhukovsky, M.G. Zheleznyak [and others]; National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. Available from <https://esu.com.ua/article-53425>. (In Ukrainian) [Коноваленко, О.С. (2016). Латориця. Енциклопедія Сучасної України. Редкол.: І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк [та ін.]; НАН України, НТШ, Інститут енциклопедичних досліджень НАН України].
13. Thematic maps of the Danube River Basin. Social and Economic Characteristics with particular attention to Hot Spots, Significant Impact Areas and Hydraulic Structures. (1999). Programme Coordination Unit UNDP/GEF Assistance. Zinke Environment Consulting for Central and Eastern Europe and Mihaela Popovici, Vienna, Austria; [https://www.icpdr.org/sites/default/files/TA\\_THEMATIC\\_MAPS.pdf](https://www.icpdr.org/sites/default/files/TA_THEMATIC_MAPS.pdf).
14. Flood issues and climate changes – Integrated Report for Tisza River Basin. (2018). Danube Transnational Programme JOINTISZA. Deliverable 5.1.2. [https://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved\\_project\\_output/0001/36/49d50d0b2429884b0a1f2eafc8c158b70bc31679.pdf](https://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved_project_output/0001/36/49d50d0b2429884b0a1f2eafc8c158b70bc31679.pdf).
15. Obodovsky, O., Onyschuk, V., Rozlach, Z. et all. (2012). Latorica: hydrology, hydromorphology, channel processes. Kyiv National University, Kyiv, “Rivers of the Carpathians” Series. (In Ukrainian) [Ободовський, О.Г., Онищук, В.В., Розлач, З.В. та ін. (2012). Латориця: гідрологія, гідроморфологія, руслові процеси. Монографія. [За ред. О.Г. Ободовського], Київ, Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», Серія «Річки Карпат»].
16. Leta, V.V., Mykuta, M.M., Salyuk, M.R., Feketa, I.Yu., and Melnychuk, V.P. (2022). Water use in the Latoritsa river basin: condition and optimization. Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology, No. 1 (63), 30-39; DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.3>. (In Ukrainian) [Лета, В.В., Микита, М.М., Салок, М.Р., Фекета, І.Ю., Мельничук, В.П. (2022). Водокористування у басейні річки Латориця: стан та оптимізація. Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія, № 1 (63), 30–39].
17. Kozak, O., and Didukh, Y. (2014). Assessment of mountain ecosystems changes under anthropogenic pressure in Latorica river basin (Transcarpathian region, Ukraine). Ekológia (Bratislava), Vol. 33, No. 4, 365–379; doi:10.2478/eko-2014-0033.
18. Central Geophysical Observatory named after Boris Sreznevsky. Available from <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/index.php?lang=en&dv=main>.
19. Stedinger, J.R., Vogel, R.M. and Foufoula-Georgia, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events. Chapter 18. In Maidment, D.R., Ed., Handbook of Hydrology, McGraw Hill, New York, 18.1-18.66.
20. Cunnane, C. (1978). Unbiased plotting positions – A review. Journal of Hydrology, Vol. 37, Issues 3-4, 205–222; [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90017-3).
21. Apel, H., Merz, B., Thielen, and A.H. (2008). Quantification of uncertainties in flood risk assessments. International Journal of River Basin Management (JRBM), Vol. 6, No. 2, 149–162; DOI: 10.1080/15715124.2008.9635344.
22. Stefanyshyn, D.V. (2021). Probability assessment of the Kyiv reservoir overflow. Environmental safety and natural resources, 40 (4), 73–99; DOI: 10.32347/2411-4049.2021.4.73-99.
23. Anghel, C.G., Stanca, S.C., Ilinca, C. (2023). Extreme Events Analysis Using LH-Moments Method and Quantile Function Family. Hydrology, 10, 159; <https://doi.org/10.3390/hydrology10080159>.

24. Review of Applied-Statistical Methods for Flood-Frequency Analysis in Europe. (2012). Editors: Castellarin, A., Kohnová, S., Gaál, L., Fleig, A., Salinas, J.L., Toumazis, A., Kjeldsen, T.R., and Macdonald, N. NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 122 p. Available from <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/19286/>.
25. Ren, M., He, X., Kan, G., Wang, F., Zhang, H., Li, H., Cao, D., Wang, H., Sun, D., Jiang, X., Wang, G., and Zhang, Z. (2017). A Comparison of Flood Control Standards for Reservoir Engineering for Different Countries. *Water*, 9, 152; doi.org/10.3390/w9030152.
26. Makkonen, L. (2006). Plotting Positions in Extreme Value Analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 45, 334–340; <https://doi.org/10.1175/JAM2349.1>.
27. Ahmad Shukri Yahaya, Norlida Md. Nor, Nor Rohashikin Mat Jali, Nor Azam Ramli, Fauziah Ahmad, and Ahmad Zia Ul-Saufie (2012). Determination of the Probability Plotting Position for Type I Extreme Value Distribution. *Journal of Applied Sciences*, 12, 1501–1506; DOI: 10.3923/jas.2012.1501.1506.
28. Ologhadien, I. (2021). Study of Unbiased Plotting Position Formulae for the Generalized Extreme Value (GEV) Distribution. *European J. of Eng. and Technology Research*, Vol. 6, Issue 4, 94–99; DOI: <http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2021.6.4.2468>.
29. Van der Spuy, D., and du Plessis, J.A. (2022). Flood frequency analysis – Part 2: Development of a modified plotting position. *Water SA* 48(2), 120–33; <https://doi.org/10.17159/wsa/2022.v48.i2.3848.2>.
30. Stefanyshyn, D.V. (2023). Testing a numerically-analytical method for prediction design maxima discharges of floods using plotting position formulas: the river Uzh case, the “Uzhhorod” gauging station data, *Environmental safety and natural resources*, 46:2, 138–162; doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.138-162.
31. Stefanyshyn, D.V. (2023). A Design Water Discharge Maxima Forecasting Method Based on Observation Data Using Plotting Position Formulas, in: *Proceedings of the International scientific and practical conference “Modeling, Control and Information Technologies”*, 6, 199–202; doi.org/10.31713/MCIT.2023.061.
32. Hossein Hassani, H., and Silva, E.S. (2015). Forecasting with Big Data: A Review. *Ann. Data. Sci.*, 2(1), 5–19; DOI 10.1007/s40745-015-0029-9.

*The article was received 27.05.2024 and was accepted after revision 11.09.2024*

**Д.В. Стефанишин**

## **ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ МАКСИМАЛЬНИХ ВИТРАТ ВОДИ ПАВОДКІВ НА РІЧЦІ ЛАТОРИЦЯ ЗА ДАНИМИ ГІДРОЛОГІЧНОГО ПОСТА «МУКАЧЕВО» З ВИКОРИСТАННЯМ ФОРМУЛ ЕМПІРИЧНОЇ ЙМОВІРНСТІ**

**Анотація.** У статті наведено результати прогнозування розрахункових максимальних витрат води паводків на річці Латориця в межах м. Мукачево з використанням формул емпіричної ймовірності за даними гідрологічних спостережень на гідрологічному посту «Мукачево». При вирішенні поставленої задачі застосовано новий непараметричний метод прогнозування за даними спостережень. Метод ґрунтується на екстраполяції розбіжності між статистичними оцінками річних ймовірностей перевищення пікових витрат води, отриманими за допомогою різних формул емпіричної ймовірності. Завдання досліджень розглядається в межах гіпотези стаціонарності максимального стоку річки з використанням ряду даних щодо максимальних витрат річки Латориця, спостережених на гідропосту «Мукачево» з 1947 по 1999 рік.

Всього було використано тринадцять формул емпіричної ймовірності. Вибір формул був довільним. Усі застосовані в дослідженні формули розглядалися як допустимі альтернативи оцінювання емпіричних ймовірностей перевищення спостережених витрат, а отримані за їх допомогою результати – як експертні оцінки, які відображають схильність носіїв рішення при розробці стратегій управління повеннями до більш обережних, але більш вартісних, або до менш вартісних, але більш ризикованих варіантів рішень.

Для зменшення епістемічної невизначеності оцінок емпіричних ймовірностей перевищення екстремальних витрат, отриманих за різними емпіричними формулами, використовувалося правило Фішберна. Згідно з цим правилом рівень значущості оцінок емпіричних ймовірностей перевищення екстремальних витрат води, отриманих за різними формулами емпіричної ймовірності, встановлювався їх ранжуванням в порядку зменшення важливості їх значення при прийнятті рішення. Залежно від вибраного варіанту поведінки носія рішення щодо значущості емпіричних оцінок, отриманих за різними формулами емпіричної ймовірності, було обчислено наступні, «зважені» за рангом, оцінки розрахункових пікових витрат (щорічними ймовірностями перевищення 1%, 0,5% та 0,2%): (1) зважені оцінки для верхньої межі (sup-оцінки), що можуть відповідати схильності носія рішення до більш обережних варіантів рішень; (2) зважені оцінки для нижньої межі (inf-оцінки), що можуть відповідати схильності носія рішення до менш вартісних, але більш ризикованих варіантів рішень в стратегіях управління повеннями. В якості можливих теоретичних альтернатив, які можуть використовуватися для прогнозування розрахункових значень максимальних витрат води, розглядалися п'ять параметричних розподілів ймовірностей: 1) трьохпараметричний гамма-розподіл Крицького-Менкеля; 2) розподіл Пірсона III типу; 3) екстремальний розподіл I типу (розподіл I типу Гумбеля); 4) логарифмічний розподіл Пірсона III типу; 5) двохпараметричний логарифмічно-нормальний розподіл. Статистичні параметри сукупності для вибраних параметричних розподілів ймовірності оцінювалися за вибірковою статистикою методом моментів.

**Ключові слова:** Щорічна ймовірність перевищення, розрахункова максимальна витрата води, епістемічна невизначеність, екстраполяція, повинь, прогнозування, дані спостережень, параметричні розподіли ймовірності, формули емпіричної ймовірності, «зважені» оцінки.

*Стаття надійшла до редакції 27.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 11.09.2024*

**Стефанишин Дмитро Володимирович**

доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

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

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

УДК 004.94 (004.62)

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

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

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

## INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR RESEARCHING THE IMPACT OF CRYPTOCURRENCY MINING TOWARDS CO<sub>2</sub> EMISSIONS

**Abstract.** *The article is dedicated to a current scientific and applied problem – the development of an information-analytical system for studying the impact of cryptocurrency mining on CO<sub>2</sub> emissions. The paper describes a system consisting of three modules, each of which has its own area of responsibility and functionality, providing flexibility for the use of various analytical models. The results of this research were achieved through the application of this system. The Pearson correlation coefficient for semi-annual data of hashrate and CO<sub>2</sub> emissions from 2014 to 2023 was calculated to be 0.87, indicating a strong linear relationship. Using Holt's linear model, it was forecasted that CO<sub>2</sub> emissions in 2025 will range from 3,895,776 to 5,259,276 tons per day. The proposed information system has a modular structure, uses data mining methods, and can be applied in other applied fields both independently and as part of other information-analytical systems as a subsystem.*

**Keywords:** *mathematical modelling, data processing, information and analytical system, CO<sub>2</sub> emission, cryptocurrency mining, Holt's linear trend model.*

**О.М. Терентьев, В.О. Дуда**

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

## ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАЙНІНГУ КРИПТОВАЛЮТ НА ВИКИДИ СО<sub>2</sub>

**Анотація.** *Стаття присвячена актуальній науково-прикладній проблемі – розробці інформаційно-аналітичної системи для дослідження впливу майнінгу криптовалют на викиди СО<sub>2</sub>. В роботі описано систему, яка складається з трьох модулів, кожен з яких має власну область відповідальності та функціонал, що забезпечує гнучкість для використання різних аналітичних моделей. Результати даного дослідження досягнуті завдяки застосуванню даної системи. Обчислено значення кореляції Пірсона для піврічних даних хешрейту та викидів СО<sub>2</sub> за період з 2014 по 2023 роки, і воно дорівнює 0,87, що свідчить про наявність сильною лінійної залежності. З використанням лінійної моделі Хольта було спрогнозовано, що кількість викидів в 2025 році буде становити від 3,895,776 до 5,259,276 т щодобово. Пропонована інформаційна система має модульну структуру, використовує методи інтелектуального аналізу даних та може застосовуватись в інших прикладних областях окремо та в складі інших інформаційно-аналітичних систем як підсистема.*

**Ключові слова:** *математичне моделювання, обробка даних, інформаційно-аналітична система, викиди СО<sub>2</sub>, майнінг криптовалют, модель Хольта з лінійним трендом.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.141-150>

© О.М. Терентьев, В.О. Дуда, 2024

ISSN: 2411-4049. Екологічна безпека та природокористування, вип. 3 (51), 2024

## Вступ

Майнінг криптовалют [1], таких як Біткойн (Bitcoin) або Етеріум (Ethereum), за останнє десятиріччя набув неабиякої популярності та розповсюдження у світі. Однак це призводить до появи проблеми енергоспоживання, оскільки майнінг криптовалют, насамперед Біткоїна, потребує значних обчислювальних потужностей. Для виконання відповідних обчислень, в криптомережі Біткоїна, використовуються спеціалізовані пристрої, які споживають велику кількість електроенергії. Це спричиняє значний вуглецевий слід [2], особливо у випадках, коли електроенергія генерується з невідновлюваних джерел, таких як вугілля або нафта. Більшість майнінгових ферм розташовані в регіонах із дешевою та часто неекологічною електроенергією, що додатково збільшує екологічне навантаження. Це призвело до рішень з обмеженнями на рівні країни чи пошуку альтернатив. Прогресивні та відповідальні майнінгові компанії починають використовувати відновлювані джерела енергії, щоб зменшити негативний вплив на довкілля. Деякі країни, наприклад Китай, вводять регуляції або заборони для зменшення енергетичного навантаження.

Дослідження впливу майнінгу криптовалют на екологію потребує використання комплексної інформаційно-аналітичної системи [3], яка повинна забезпечувати збір, збереження, аналіз та візуалізацію даних, що стосуються енергоспоживання, екологічних аспектів. Така інформаційно-аналітична система повинна забезпечувати автоматичний збір даних про хешрейт криптовалют з різних джерел, а також видобувати дані про енергоспоживання майнінгового обладнання, про вартість електроенергії та використання природних ресурсів для її генерації. Для розуміння екологічного впливу обчислювати вуглецевий слід на основі зібраних даних про енергоспоживання.

Криптомережі використовують різні механізми консенсусу. Майнінг, або Proof-of-Work (PoW), працює на ідеї, що для підтвердження блоку та отримання нагороди потрібно зробити велику кількість операцій. Альтернативою цього підходу є Proof-of-Stake (PoS), який не вимагає значних обчислювальних потужностей. Необхідно лише володіти певною кількістю монет, і від їх кількості залежить ймовірність бути обраним валідатором для отримання винагороди за підтвердження транзакцій у криптомережі.

## Постановка задачі

Метою цього дослідження є розробка системи для вивчення майнінгу криптовалют, зокрема Біткоїна та Етеріума, з акцентом на його ефективність, інструменти, що використовуються в цьому процесі, а також на вплив споживання електроенергії [4] та викиди CO<sub>2</sub>. Дане дослідження спрямоване на створення системи аналізу ефективності майнінгу з точки зору використання ресурсів, оцінку вартості електроенергії, необхідної для здійснення майнінгових операцій, та вивчення екологічних наслідків діяльності майнерів. Особливу увагу буде приділено вивченню впливу високого споживання енергії на довкілля і розгляду можливих шляхів зменшення негативного ефекту.

Задача дослідження полягає в наступних етапах:

– Пошук інформаційних джерел для вивантаження даних про хешрейт видобутку Біткоїна, викиди CO<sub>2</sub> тощо.

– Розробка системи для збору та обробки інформації. Розбиття її на модулі з різним функціоналом та областями відповідальності. Розробка аналітичного підмодуля для підготовки, нормалізації та перевірки на коректність зібраних даних перед подальшим аналізом.

– Створення методів та алгоритмів для виявлення зв'язків між різними параметрами, такими як хешрейт та вуглецевий слід.

– Використання статистичних методів та моделей для прогнозування впливу майнінгу на екологію.

– Оцінка рівня викидів CO<sub>2</sub>. Визначення рівня викидів CO<sub>2</sub>, пов'язаних із споживанням електроенергії для майнінгу. Аналіз впливу споживання енергії на вуглецевий слід.

– Пошук можливих рішень для зменшення впливу майнінгу на довкілля.

– Дослідження альтернативних методів майнінгу, які можуть бути менш енергозатратними та мають мінімальні негативні впливи на екологію.

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

У статті "Cryptocurrency energy consumption: Analysis, global trends and interaction" [5], застосовуючи кореляційно-регресійний аналіз, дослідники розробили модель, яка відображає залежність між витратами в IT-секторі, енергоспоживанням для майнінгу монет Біткоїна та Етеріума і глобальною капіталізацією ринку криптовалют. В їх дослідженні було прогнозовано, що споживання енергії для майнінгу Біткоїна може збільшитися до 142 ТВт·год на рік до 2026 року, а вплив на довкілля від видобутку Біткоїна в 2022 році становив щонайменше 27,4 млн тонн викидів CO<sub>2</sub>.

Кембриджський Біткойн-індекс споживання електроенергії (CBECI – Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index) [6] є інструментом для оцінки щоденного споживання електроенергії мережею Біткоїна та прогнозування щорічного споживання електроенергії. Його методологія базується на гібридному підході зверху вниз, спочатку розробленому Марком Бевандом, який використовує кошик реального обладнання з припущенням, що майнери діють як раціональні економічні агенти, використовуючи тільки прибуткове обладнання.

У дослідженні "Implications of cryptocurrency energy usage on climate change" [7] було встановлено зв'язок між викидами CO<sub>2</sub> та енергоспоживанням для майнінгу Біткоїна. Результати показали, що хешрейт має найбільший вплив на викиди CO<sub>2</sub> та енергоспоживання для його видобутку.

### **Теоретичні основи дослідження**

Майнінг, або Proof-of-Work [1], є процесом видобутку цифрової валюти за допомогою спеціалізованого обладнання, який здійснюють учасники мережі [8]. Показник складності майнінгу [10] визначається хешрейтом мережі та часом, витраченим на знаходження попередніх блоків. Якщо хешрейт збільшується, це означає, що до майнінгу криптовалюти приєдналися нові учасники, додавши своє обладнання до мережі. Це призводить до зростання обчислювальної потужності мережі, що зменшує час, необхідний для знаходження блоку, порівняно з нижчим хешрейтом.

Хешрейт [9] – це сумарна обчислювальна потужність майнінгового обладнання, залученого в процес видобутку криптовалюти.



## Система збору та обробки інформації

Інформаційно-аналітична система для дослідження впливу майнінгу криптовалют на економіку та екологію являє собою складну структуру, що охоплює декілька важливих компонентів та процесів. Для комплексного підходу до даного дослідження систему було поділено на три головних модулі, як показано на рис. 1: модуль збору інформації, модуль аналізу даних, модуль збереження та візуалізації даних.

Модуль збору інформації призначений для збору та збереження даних, пов'язаних з енергоспоживанням, екологічними та економічними аспектами майнінгу. Початкові дані збираються з різних джерел, що включають дані про хешрейт та ціни криптовалют, ефективність майнінгового обладнання та інформацію про екологічний вплив для генерації електроенергії.

Модуль аналізу даних відповідає за обробку зібраних даних, перетворюючи їх у табличні результати. Спершу проводиться попередня обробка: очищення від можливих помилок і аномалій, а також заповнення відсутніх значень.

Для обчислення кількості викидів CO<sub>2</sub> використовуються дані про енергоспоживання для розрахунку вуглецевого сліду. Це включає обчислення викидів CO<sub>2</sub>, пов'язаних з виробництвом електроенергії для майнінгу, із урахуванням типу енергетичних ресурсів, що використовуються. Система аналізує, наскільки майнінг впливає на навколишнє середовище.

Модуль збереження та візуалізації даних відповідає за сховище, що накопичує результати аналізу у вигляді звітів, таблиць, графіків. Через цей модуль користувач взаємодіє з результатами роботи системи.

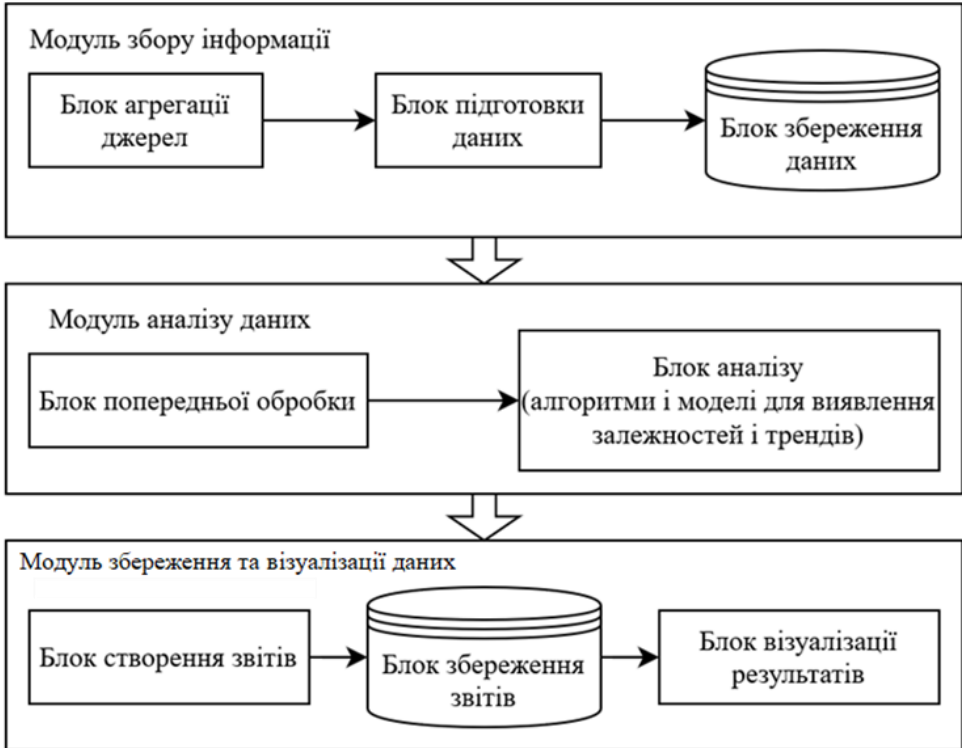


Рис. 1. Структура інформаційно-аналітичної системи

## Екологічна проблема

Майнінг криптовалют є енергоємним процесом, і тому багато майнінг-ферм розташовані в регіонах з дешевою електроенергією (Грузія, Чорногорія, Україна, Казахстан), яка часто виробляється з вугілля або природного газу. Це зумовлює значний вуглецевий слід, оскільки спалювання вугілля та природного газу є основними джерелами викидів вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) і інших шкідливих речовин.

Загальновідомо, що збільшення світового хешрейту тісно корелює зі збільшенням викидів  $\text{CO}_2$ . Тобто, якщо вуглекислого газу при спалюванні вугілля виділяється більше 1 кг на 1 кВт·год [12], то, на основі попередніх обчислень, в атмосферу потрапляє більше ніж 216 000 тонн  $\text{CO}_2$  кожен день.

Зв'язок між зростанням хешрейту та викидами  $\text{CO}_2$  наведено на рис. 2. Обчислене значення кореляції Пірсона, для піврічних даних хешрейту та викидами  $\text{CO}_2$  за період з 2014 по 2023 роки, дорівнює 0,87, що свідчить про наявність сильної лінійної залежності.

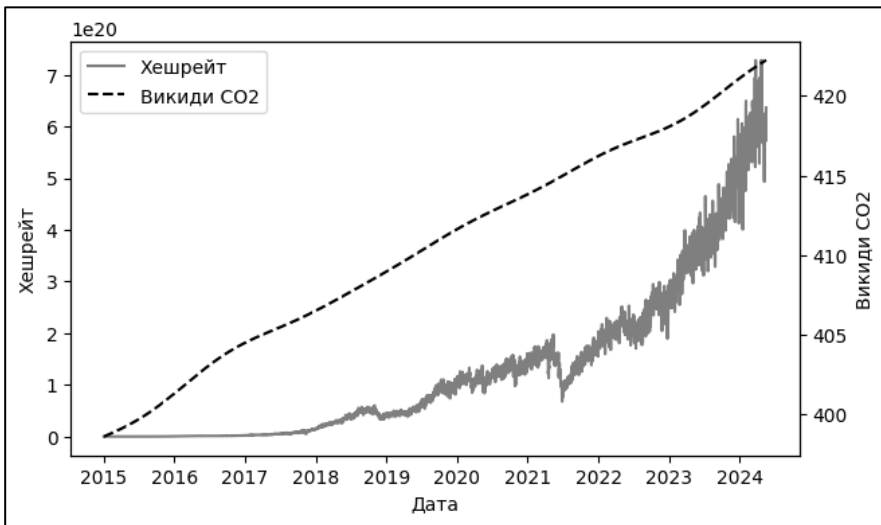


Рис. 2. Графік хешрейту (суцільна лінія, ліва вісь ординат, одиниця виміру  $10^{20}$  X/c) та викидів  $\text{CO}_2$  (штрихова лінія, права вісь ординат) за період з 2015 по 2024 роки

Оскільки хешрейт постійно з часом зростає, потреба в енергії для майнінгу збільшується, що, у свою чергу, підвищує викиди  $\text{CO}_2$ , особливо якщо значна частина електроенергії походить від спалювання саме викопного палива (табл. 1).

Перехід до використання електростанцій з відновлюваними джерелами енергії для майнінгу криптовалют сприяє: зменшенню викидів  $\text{CO}_2$ , зменшенню залежності від постачання вугілля та газу, стабільним витратам на енергію, позитивному іміджу криптоіндустрії через підтримку сталого розвитку.

Так як електростанції з відновлюваними джерелами періодично мають надлишкову енергію, то використання її для майнінгу може стати додатковим джерелом доходу для країни. Це дозволяє ефективно використовувати ресурси, які раніше були непридатними для комерційного використання.

Таблиця 1. Порівняння генерації енергії та кількості викидів CO<sub>2</sub> різними енергоресурсами в ЄС за 2023 рік [11]

Енергоресурс	Мін. генерація електроенергії (ГВт)	Макс. генерація електроенергії (ГВт)	Мін. к-сть викидів CO <sub>2</sub> (Мт/день)	Макс. к-сть викидів CO <sub>2</sub> (Мт/день)
Вугілля	23.63	57.46	0.65	1.58
Викопний газ	30.52	57.9	0.29	0.53
Атомна	56.71	78.43	Немає викидів	Немає викидів
Гідро	29.42	50.5	Немає викидів	Немає викидів
Вітряна	26.89	74.03	Немає викидів	Немає викидів
Сонячна	5.19	36.3	Немає викидів	Немає викидів

Заборона майнінгу криптовалют є також одним із варіантів розв'язання проблем, пов'язаних з високим енергоспоживанням та негативним впливом на екологію. Цей підхід передбачає введення на державному рівні регуляцій або повних заборон на діяльність, пов'язану з майнінгом криптовалют. Наслідки заборони майнінгу в Китаї показано в табл. 2, у вигляді зниження викидів CO<sub>2</sub> від майнінгу до нуля в цій країні.

Таблиця 2. Порівняння кількості викидів CO<sub>2</sub> за 2022 та 2024 роки [5]

Країна	Кількість викидів CO <sub>2</sub> на 1 Твт·год	Відсоток світового хешрейту на 2022 рік	Кількість викидів CO <sub>2</sub> на 2022 рік (Мт)	Відсоток світового хешрейту на 2024 рік	Кількість викидів CO <sub>2</sub> на 2024 рік (Мт)
США	0.367	41	10.34	35.4	25
Китай	0.531	23	8.39	0	0
Казахстан	0.636	14	6.12	18.1	22.1
Малайзія	0.544	3	1.12	4.58	4.7
Німеччина	0.385	3	0.79	4.48	3.3
Канада	0.128	7	0.62	9.55	2.3

### Прогнозування значення хешрейту на основі лінійної моделі Хольта

З метою прогнозування майбутнього значення хешрейту криптовалюти Біткоїн, що буде досягнуто в період з 2024 по 2030 роки, була побудована модель Хольта із урахуванням лінійного тренду. Дана модель – це модифікація методу експоненційного згладжування, що включає трендову складову. Описується дана модель наступним рівнянням [13]:

$$\hat{x}_\tau(t) = \hat{a}_{1,t} + \tau \cdot \hat{a}_{2,t},$$

де  $\hat{x}_\tau(t)$  – значення прогнозу хешрейту,  $\hat{a}_{1,t}$  – прогноз, очищений від тренду (за своєю суттю – експоненційне згладжування),  $\hat{a}_{2,t}$  – параметр лінійного тренду, параметр  $\tau$  – горизонт прогнозування [13]. Хольтом були запропоновані наступні рівняння для обчислення параметрів адаптації моделі лінійного росту:

$$\hat{a}_{1,t} = \alpha_1 \cdot x_t + (1 - \alpha_1) \cdot (\hat{a}_{1,t-1} + \hat{a}_{2,t-1}), \quad (1)$$

$$\hat{a}_{2,t} = \alpha_2 \cdot (\hat{a}_{1,t} + \hat{a}_{1,t-1}) + (1 - \alpha_2) \cdot \hat{a}_{2,t-1}, \quad (2)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2 \in (0 ; 1)$  – параметри експоненційного згладжування.

В рамках даного дослідження на основі використання мови програмування Delphi було реалізовано наступний алгоритм оцінювання параметрів моделі, що складається з двох кроків.

Перший крок – оцінювання коефіцієнтів. Для визначення початкових значень параметрів адаптації (оцінок коефіцієнтів адаптивного полінома першого порядку)  $\hat{a}_{1,1}$  та  $\hat{a}_{2,1}$ , якщо розглянути горизонти прогнозування на 0 та 1 кроків, то можна отримати наступні рівняння [13]:

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \hat{x}_{\tau=0}(t = 1) = \hat{a}_{1,1}, \\ \hat{x}_2 &= \hat{x}_{\tau=1}(t = 1) = \hat{a}_{1,1} + \hat{a}_{2,1}. \end{aligned}$$

Нехай  $\hat{x}_1 = x_1$ ,  $\hat{x}_2 = x_2$ , тоді можна отримати  $\hat{a}_{1,t}$  та  $\hat{a}_{2,t}$  в момент часу  $t = 2$  у вигляді [13]:

$$\begin{aligned} \hat{a}_{1,2} &= x_1, \\ \hat{a}_{2,2} &= x_2 - x_1. \end{aligned}$$

Другий крок – побудова прогнозу моделі Хольта. Обчисливши значення коефіцієнтів  $\hat{a}_{1,t}$  та  $\hat{a}_{2,t}$  на момент часу  $t$ , можна будувати прогноз  $\hat{x}(t + \tau)$ , тобто в момент часу на  $\tau$  кроків вперед (горизонт  $\tau$ ) за формулою [13]:

$$\hat{x}(t + \tau) = \hat{x}_\tau(t) = \hat{a}_{1,t} + \tau \cdot \hat{a}_{2,t}.$$

Наприклад, для горизонту прогнозування  $\tau = 1$  маємо:

$$\hat{x}_3 = \hat{x}(2 + 1) = \hat{x}_1(2) = \hat{a}_{1,2} + \hat{a}_{2,2},$$

де  $\hat{a}_{1,2} = x_1$  та  $\hat{a}_{2,2} = x_2 - x_1$ .

Після чого обчислюються  $\hat{a}_{1,3}$  та  $\hat{a}_{2,3}$  за формулами (1) та (2) і отримуємо

$$\hat{x}_4 = \hat{x}(3 + 1) = \hat{x}_1(3) = \hat{a}_{1,3} + \hat{a}_{2,3},$$

далі аналогічним чином процес продовжується.

Перед побудовою моделі, дані хешрейту було прологарифмовано десятковим логарифмом, з метою згладжування викидів та аномалій в даних дослідженнях та звуження області допустимих значень. В результаті для наведеної моделі Хольта було отримано наступні значення оцінок коефіцієнтів моделі:  $\hat{a}_{1,t} = 0,75$  та  $\hat{a}_{2,t} = 0,34$ . Для обчислення оцінок коефіцієнтів було використано власноруч написану програму, на мові програмування Delphi. На основі отриманої моделі побудовано прогноз на логарифмованих даних, після чого виконано операцію оберненого десяткового логарифмування, тобто десять піднесена до ступеня значення прогнозу. Статистична характеристика моделі за критерієм MAPE (mean absolute percent error – середня абсолютна

процентна похибка) склала 35%, тобто на ретроспективних історичних даних прогноз моделі відхилився від реального в середньому на 35%. В табл. 3 наведено відповідні реальні та отримані, на основі побудованої моделі Хольта, значення прогнозу хешрейту з 2014 до 2030 року.

Таблиця 3. Реальне та прогнозні значення хешрейту криптовалюти Біткоїн

Рік та місяць	Хешрейт (реальне значення) (X/c)	Хешрейт (десятичний логарифм) (X/c)	Прогнозне значення хешрейту (десятичний логарифм)	Прогнозне значення хешрейту (X/c)
2014_12	3,12109E+17	1,2429	17,3635	2,3094E+17
2015_12	8,22063E+17	1,2532	17,8407	6,92968E+17
2016_12	2,54042E+18	1,2649	18,4505	2,82171E+18
2017_12	1,42492E+19	1,2823	18,9662	9,25119E+18
2018_12	4,25221E+19	1,2929	19,8560	7,17724E+19
2019_12	9,51742E+19	1,3006	20,0703	1,17566E+20
2020_12	1,44611E+20	1,3045	20,2788	1,90027E+20
2021_12	1,72503E+20	1,3061	19,9764	9,47182E+19
2022_12	2,5304E+20	1,3097	20,4323	2,70586E+20
2023_12	4,1271E+20	1,3142	20,6097	4,07094E+20
2024_12			20,8170	6,56195E+20
2025_12			21,0199	1,04691E+21
2026_12			21,2228	1,67027E+21
2027_12			21,4257	2,66478E+21
2028_12			21,6285	4,25145E+21
2029_12			21,8314	6,78287E+21
2030_12			22,0343	1,08216E+22

На основі отриманих результатів можна розробити декілька сценаріїв.

**Сценарій 1 (базовий, позитивний).** Значення хешрейту у 2030 році буде дорівнювати 1,08216E+22, а ціна на електроенергію не зміниться і становитиме 0,11 євро. В цьому випадку кожен день викиди CO<sub>2</sub> будуть становити 3895776 т, а загальні витрати на майнінг дорівнювати 428,53 мільйонів євро.

**Сценарій 2 (критичний, негативний).** Значення хешрейту у 2030 році буде на 35% більше від базового позитивного сценарію та дорівнюватиме 1,46091E+22, при цьому вартість електроенергії зросте майже удвічі до 0,2 євро. В цьому випадку кожен день викиди CO<sub>2</sub> будуть становити 5 259 276 т, а загальні витрати на майнінг дорівнювати 1,052 мільярдів євро.

Для другого сценарію, значення ціни за електроенергію у 0,2 євро було визначено як найбільш очікувану, на основі аналізу зміни середньоєвропейської ціни за останні 7 років. Протягом цього періоду ціна на електроенергію зросла майже на 85%.

## Висновки

У цій роботі представлено інформаційно-аналітичну систему для дослідження впливу майнінгу криптовалют на світове споживання електроенергії та викиди CO<sub>2</sub>. Система складається з модулів, кожен з яких має власну область відповідальності та функціонал, що забезпечує гнучкість для використання різних аналітичних моделей. Результати дослідження наведені у вигляді таблиць та графіків.

В ході дослідження порівнюються різні інструменти майнінгу криптовалют та підходи, такі як Proof-of-Work (PoW) і Proof-of-Stake (PoS). Особлива увага приділяється оцінці споживання електроенергії в ЄС та рівню викидів CO<sub>2</sub>, пов'язаних із майнінговою діяльністю.

Розроблено модуль для збору, обробки та аналізу інформації про обладнання для майнінгу, хешрейт, ціни на електроенергію в ЄС та викиди CO<sub>2</sub>. З використанням моделі Хольта із включенням лінійного тренду було спрогнозовано вплив майнінгу на економіку та екологію на 2030 рік.

Досліджено можливі рішення для зменшення негативного впливу майнінгу на довкілля. Зокрема, запропоновано перехід на Proof-of-Stake, що дозволяє значно зменшити споживання енергії та викиди CO<sub>2</sub>.

## REFERENCES

1. Gervais, A., Karame, G. O., Wüst, K., Glykantzis, V., Ritzdorf, H., & Capkun, S. (2016). On the security and performance of proof of work blockchains. In *Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC conference on computer and communications security* (pp. 3-16).
2. Butrym, O. V., & Panchenko, G. G. (2023). Carbon footprint of electricity production. *Energy Technologies & Resource Saving*, 77(4), 19–30. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.02>
3. Trofymchuk, O. M., & Itskovych, V. Ye. (2023). Method of processing information about the state of the environment based on data obtained through a service-oriented network. *Environmental Safety and Natural Resources*, 48(4), 117–129. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.117-129>
4. Ethereum. Ethereum Energy Consumption. Retrieved from <https://ethereum.org/en/energy-consumption/>
5. Bublyk, Y., Borzenko, O., & Hlazova, A. (2023). Cryptocurrency energy consumption: Analysis, global trends and interaction. *Environmental Economics*, 14(2), 49–59. [https://doi.org/10.21511/ee.14\(2\).2023.04](https://doi.org/10.21511/ee.14(2).2023.04)
6. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. Retrieved from <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>
7. Zhang, D., Chen, X. H., Lau, C. K., & Xu, B. (2023). Implications of cryptocurrency energy usage on climate change. *Technological Forecasting and Social Change*, 187, 122219. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122219>
8. Bitcoin. Running A Full Node. Retrieved from <https://bitcoin.org/en/full-node#what-is-a-full-node>
9. What is cryptocurrency mining? [Що таке майнінг криптовалют?] (In Ukrainian). Retrieved from <https://blog.whitebit.com/uk/what-is-cryptocurrency-mining/>
10. Fantazzini, D., & Kolodin, N. (2020). Does the Hashrate affect the bitcoin price? *Journal of Risk and Financial Management*, 13(11), 263. <https://doi.org/10.3390/jrfm13110263>
11. EU CO2 emission tracker. Retrieved from <https://energyandcleanair.org/product/eu-co2-emission-tracker/>

12. Skrypnyk, D. (2021). Organizational and economic mechanism of energy efficiency model development of the national economy (p. 111). Retrieved from [https://science.snau.edu.ua/wp-content/uploads/2021/12/Diss\\_SkrypnykD.pdf](https://science.snau.edu.ua/wp-content/uploads/2021/12/Diss_SkrypnykD.pdf)
13. Holt, C. C. (2004a). Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International Journal of Forecasting*, 20(1), 5–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2003.09.015>

*Стаття надійшла до редакції 20.06.2024 і прийнята до друку після рецензування 06.09.2024*

*The article was received 20.06.2024 and was accepted after revision 06.09.2024*

**Терентьєв Олександр Миколайович**

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

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

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

**Дуда Володимир Олександрович**

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

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

УДК: 004.056.53

**Volodymyr Zinchenko**<sup>1</sup>, graduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6081-4848> **e-mail:** zinchenko@outlook.com

**Volodymyr Lyfar**<sup>2</sup>, Doctor of Engineering Sciences, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7860-9663> **e-mail:** lifar@snu.edu.ua

<sup>1</sup>Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine

## INFORMATION AND MATHEMATICAL MODEL OF QUANTUM COMMUNICATION CHANNEL STATE CONTROL PROCESSES

**Abstract.** *The most protected and stable communication systems today are quantum channels of information transmission and processing. Thanks to the unique properties of photons as information elements, it becomes possible to monitor and analyze the state of information flows in communication or information transmission channels. Physical attributes such as spin, polarization, radiation frequency, phase synchronization, and the quantum entanglement effect can be tracked and interpreted online to improve the quality and reliability of information in computer systems. In order to effectively use information in support or decision support systems, it is necessary to carefully formalize the processes and indicators of quantum systems for the creation of information processing and transmission, for which information and mathematical models should be created that describe the state of the quantum communication channel (QCC).*

*The information model should allow the convolution of the information space. The mathematical model must prove the processes of tracking the states of quantum information and provide a description of the phase state of indicators of the quantum environment. A lock in a closed space with established cause-and-effect relationships is equal to a system of clear logic.*

*The authors summarize the experience of developing and implementing the method of simulated dynamic modeling of events in an abstract communication channel, which allows formalizing and classifying cause-and-effect relationships of quantum carriers in the analyzed channels. It is proposed to use a unified neural network for the organization of SPPR in quantum-mechanical information transmission systems. Such a network could provide an automatic intelligent system state analysis mode. Such an analysis makes it possible to classify the aggregates of current system parameters to the level of diagnostics of the state of information flows and conclusions based on such diagnostics with the support of decision-making about the quality and reliability of the transmitted information. Such a system, working in OLAP (Online analytical processing) mode, could automatically manage the process of generation and transmission of information, reacting without human intervention to emerging critical errors or attempts at unauthorized system hacking. The observer effect leads to the fact that an attempt to measure the state of a photon inevitably causes an almost instantaneous change in this state. Attempting to parallelize a photon has the same consequences. This cannot be unnoticeable during further authorized acceptance of information. The analyzed quantum communication channel (QCM) consists of a set of technological elements distributed in space. The channel works in its own time, which is formed by clock pulses and creates a flow of information.*

**Keywords:** *information, mathematical model, cryptography, quantum, neural network, information protection, decision support.*



В.Л. Зінченко<sup>1</sup>, В.О. Лифар<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, Україна

## ІНФОРМАЦІЙНА ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ КОНТРОЛЮ СТАНУ КВАНТОВОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

***Анотація.** Найбільш захищеними і стійкими системами зв'язку на сьогоднішній день є квантові канали передачі і обробки інформації. Завдяки унікальним властивостям фотонів як інформаційних елементів стає можливим відстежувати і аналізувати стан інформаційних потоків в каналах зв'язку або передачі інформації. Такі фізичні атрибути, як спін, поляризація, частота випромінювання, синхронізація фаз та ефект квантової запутаності, можна відслідковувати та інтерпретувати в онлайн режимі, щоб покращити якість та достовірність інформації в комп'ютерних системах. Для того щоб ефективно застосовувати інформацію в системах супроводження або підтримки рішень, необхідно ретельно формалізувати процеси та показники квантових систем створення обробки та передачі інформації, для чого слід створити інформаційні та математичні моделі, що описують стан квантового каналу зв'язку (ККЗ).*

*Інформаційна модель повинна дозволити згортку інформаційного простору. Математична модель повинна підтвердити процеси відстеження станів квантової інформації та надати опис фазового стану індикаторів квантового середовища. Замкнена система в просторі з усталеними причинно-наслідковими зв'язками рівнозначна системі чіткої логіки.*

*Автори узагальнюють досвід розробки і впровадження методу імітаційного динамічного моделювання подій в абстрактному каналі зв'язку, що дозволяє формалізувати та класифікувати причинно-наслідкові зв'язки квантових носіїв в аналізованих каналах. Для організації СППР в квантово-механічних системах передачі інформації пропонується використовувати уніфіковану нейронну мережу. Така мережа могла б забезпечити автоматичний інтелектуальний режим аналізу стану системи. Такий аналіз дає можливість класифікації сукупностей поточних параметрів системи до рівня діагностики стану інформаційних потоків і висновків на основі такої діагностики з підтримкою прийняття рішення про якість та надійність переданої інформації. Така система, працюючи в OLAP (Online analytical processing) режимі, могла б автоматично забезпечити управління процесом генерації та передачі інформації, реагуючи без втручання людини на виникаючі критичні помилки або спроби несанкціонованого злову системи. Ефект спостерігача призводить до того, що спроба вимірювання стану фотона неминуче викликає практично миттєву зміну цього стану. Спроба розпаралелювання фотона має ті ж наслідки. Це не може бути непомітним при подальшому санкціонованому прийманні інформації. Канал квантового зв'язку (ККЗ), що аналізується, складається з множини технологічних елементів, розподілених в просторі. Канал працює у власному часі, що формується тактовими імпульсами та створює потік інформації.*

***Ключові слова:** інформаційна, математична модель, криптографія, квант, нейронна мережа, захист інформації, підтримка рішень.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.151-160>

## Вступ

Авторами запропонована нейронна мережа для діагностики квантового каналу зв'язку – це штучна нейронна мережа, яка здатна виявляти та виправляти помилки, що виникають під час передачі квантової інформації між віддаленими квантовими системами [1–6]. Така мережа може використовуватись для підвищення надійності та безпеки квантового зв'язку, а також для прискорення квантових обчислень.

Одним із прикладів такої нейронної мережі є згорткова нейронна мережа, яка може виявляти патології в квантовому каналі, такі як втрата або деформація фотонів, на основі аналізу спектральних характеристик. Згорткова нейронна мережа складається з кількох шарів, у яких відбувається згортка, підвибір та класифікація вхідних даних. Згорткова нейронна мережа може бути навчена на великій кількості експериментальних даних, отриманих за різних умов квантового каналу, і потім використовуватися для діагностики нових даних в режимі реального часу.

## Постановка задачі

В загальному комплексі заходів щодо забезпечення національної безпеки держави важливе місце займають заходи, пов'язані із безпосереднім захистом інформації від загроз, реалізація яких може завдати особі, суспільству, державі політичні, економічні, фінансові та інші збитки.

Серед загроз інформації за своїми небезпечними наслідками особливе місце займають:

1. Здобування технічними розвідками відомостей у сфері оборони, економіки, науки і техніки, зовнішніх відносин, державної безпеки та охорони правопорядку. Незважаючи на позитивні зміни в міжнародній обстановці навколо України, діяльність технічних розвідок іноземних держав із здобування інформації продовжується. Проти України безперервно ведеться розвідка багатофункціональними космічними, повітряними, наземними, морськими системами та комплексами технічної розвідки. Провідні країни світу продовжують модернізувати свої розвідувальні служби, вдосконалюють технічну розвідку, нарощують її можливості. Наявні можливості технічних розвідок практично вже сьогодні дають змогу забезпечити безперервне спостереження за всією територією України, і у подальшому, засоби технічної розвідки, зокрема космічної компоненти, будуть мати виключно високі характеристики, які дозволять забезпечити постійне стеження за всією територією держави в реальному масштабі часу.

2. Несанкціонований доступ до інформації, яка обробляється та циркулює в інформаційних та телекомунікаційних системах, а також спеціальний вплив на інформацію з метою її спотворення, руйнування, знищення, порушення нормального функціонування систем обробки інформації. За умови недостатньої номенклатури засобів обробки інформації та програмного забезпечення вітчизняної розробки в інформаційно-телекомунікаційних системах широко використовуються продукти іноземного виробництва, які здебільшого не мають об'єктивних оцінок механізмів захисту, а також створюють передумови впровадження в усі сфери життєдіяльності особи, суспільства та держави інформаційних технологій. Це зумовило широке

розгортання інформаційно-телекомунікаційних систем, різке збільшення обсягів інформації, що обробляється і зберігається в цих системах, значне збільшення кола користувачів, які мають безпосередній доступ до інформаційних ресурсів, тощо. При цьому, за відсутності конкурентоспроможних вітчизняних зразків, перевага надається інформаційним технологіям та технічним засобам обробки інформації іноземного виробництва, які здебільшого не забезпечують захист інформації, а також створюють передумови неконтрольованого використання спеціальних програмних та апаратних засобів (“закладних пристроїв”). У світі зберігається тенденція поширення масштабів комп’ютерної злочинності, розповсюдження комп’ютерних вірусів, насамперед, з використанням інтернету, істотно зростає небезпека наслідків неправомірних дій, технічних і технологічних помилок та збоїв при застосуванні інформаційно-телекомунікаційних систем, що є особливо актуально в умовах широкого входження вітчизняних інформаційно-телекомунікаційних систем до глобальних. Окремими державами реалізується “концепція інформаційного протиборства”, яка полягає в реалізації заходів щодо спеціального впливу на інформаційну інфраструктуру з метою ураження (знищення) інформаційних ресурсів та руйнування системи управління в сферах оборони, економіки, безпеки, фінансів тощо.

3. Витік інформації з обмеженим доступом технічними каналами внаслідок виникнення побічних електромагнітних випромінювань і наводів, ведення акустичної та оптико-електронної розвідки в безпосередній близькості від об’єкта інформаційної діяльності. В процесі здійснення інформаційної діяльності для зберігання, обробки та передавання інформації, в тому числі й інформації з обмеженим доступом, широко використовуються технічні засоби різного призначення (засоби обчислювальної техніки, оргтехніка, засоби зв’язку, автоматизовані системи тощо). На об’єктах інформаційної діяльності здійснюється обговорення службових питань за різними напрямками діяльності установи, в ході яких може озвучуватися інформація з обмеженим доступом. Проте, окремі фізичні процеси, що відбуваються в технічних засобах та під час обговорення інформації, та інші фактори створюють об’єктивні передумови для появи технічних каналів витоку інформації, що зумовлює необхідність реалізації заходів зі створення комплексів (систем) технічного захисту інформації, спрямованих на запобігання витоку інформації цими каналами.

При моделюванні використовуються квантові коди, що виправляють помилки. При передачі інформації по каналу з шумом, а також при виконанні квантових операцій бажано використовувати код, який був би стійкий щодо помилок. У класичному випадку принципова можливість такого кодування при швидкостях передачі, менших за пропускну здатність, впливає з теореми Шеннона. Однак ця теорема не дає конструктивного способу побудови перешкодостійкого коду, і практичному вирішенню цієї проблеми присвячена значна частина досліджень з теорії інформації, що становить теорію кодування.

Найпряміший спосіб застрахуватися від помилок полягає у повторенні повідомлень (що, звичайно, знижує швидкість передачі). Нехай в алфавіті є всього два символи 0, 1. Тоді припустимо, що ймовірність зміни одного біта в процесі передачі дорівнює малій величині  $p$ , так що ймовірність зміни двох бітів  $p^2$  зневажливо мала. Розглянемо код  $0 \rightarrow 00, 1 \rightarrow 11$ . Хоча цей код і дозволяє виявити та виправити деякі помилки, він має істотний недолік:

наприклад, у ситуації однієї помилки у другому чи першому биті  $00 \rightarrow 01$ ,  $11 \rightarrow 01$  ми можемо сказати, яке повідомлення було закодовано. Але цього недоліку можна позбутися, якщо додати ще один розряд:  $0 \rightarrow 000$ ,  $1 \rightarrow 111$ . Такий код буде вже на заваді стійким по відношенню до помилки в будь-якому одному биті, в тому сенсі, що зіпсовані слова, що виходять з  $000$  і  $111$ , ніколи не збігаються і тому безпомилково помітні [7–12].

У квантовій статистиці безпомилкова помітність чистих станів (а ми тут матимемо справу тільки з ними) рівносильна ортогональності векторів станів. Прямолінійне узагальнення класичного рецепту повторення повідомлень на квантовий випадок наштовхується на труднощі – квантову інформацію неможливо розмножити. По суті квантової інформації, під час передачі через канал з помилками безпомилково повинні прийматися як базисні стани, та й усілякі їх суперпозиції  $|\psi\rangle$ . Таким чином, прямолінійне узагальнення коду повторення  $\psi\rangle \rightarrow |\psi\rangle \otimes |\psi\rangle \otimes |\psi\rangle$  є нездійсненним. На перший погляд, завдання здається нерозв'язним, проте у роботах Шора і Стіна незалежно були побудовані перші приклади квантових кодів, які виправляють помилки [12–17].

Необхідно розробити інформаційну та математичну моделі для згортки та замкнення простору обчислювань в області визначення та області застосування моделей, що імітують реальні канали квантового зв'язку.

### Вирішення поставленої задачі

Авторами узагальнена математична модель процесів контролю стану системи квантової передачі інформації та алгоритмів підтримки рішень, що може бути представлена кортежем:

$$GIQ = \langle PK, R, Qb, F(S), Kk, DSS \rangle, \quad (1)$$

де  $Pk = \{pk_j\}$  – множина показників квантового каналу зв'язку;

$R$  – множина регістрів каналу зв'язку по розрядах;

$Qb$  – множина інформаційних елементів  $Q$  бітів, які формують стан фотонного середовища каналу зв'язку;

$F(S) = \{f(s_i)\}$  – функція розробки прийняття рішення, як повне сюр'єктивне відображення множини симптомів  $S$  на множину рішень  $DSS$ ;

$Kk$  – множина показників квантового каналу зв'язку, що відповідає формуванню стану порозрядних елементів;

$DSS$  – множина елементарних рішень, що формують алгоритми дій в системі підтримки прийняття рішень.

Передбачається, що відомі детерміновані показники фізичних процесів, які можуть виникати в  $i$ -й підсистемі для  $j$ -х станів, що відображає вектор симптомів на вектор подій:

$$fe_{ij} : \vec{S}_{ij} \rightarrow \vec{\Phi}_{ij}, j = 1..J, \quad (2)$$

де  $j$  – набір елементарних подій, що призводять до відмов в каналі,  $\vec{S}_{ij}$  – вектор параметрів, що відповідає поточному стану  $i$ -ї підсистеми;  $\vec{\Phi}_{ij}$  – вектор фазових змінних квантових процесів, які можуть виникнути в  $i$ -й підсистемі.

Розглядається узагальнена інформаційна модель нештатної ситуації в ККЗ для аналізу і передбачення наслідків відмов.

Для розробки надійної системи класифікації стану лінії квантового передавання інформації пропонується використовувати гібридні методи аналізу та захисту від небезпеки каналів зв'язку, які, з одного боку, забезпечують надійність діагностування станів системи, а з іншого – надають можливість активного застосування математичного кодування сигналів для збільшення надійності каналів зв'язку до прийняттого рівня. На основі досвіду використання різних кодів автор рекомендує описаний нижче модифікований алгоритм протоколу BB84 та інші його різновиди.

Ідея полягає в наступному: є два віддалених один від одного учасники, А та В, які потребують спільний бінарний ключ, тобто послідовність  $\kappa = (\kappa_1, \dots, \kappa_m)$  довжини  $m$ . Цей ключ учасники бажають використовувати для кодування та декодування своїх повідомлень, які також є бінарними послідовностями довжини  $m$ , за допомогою операції XOR посимвольно:  $y_k = x_k \oplus \kappa_k$ ,  $x_k = y_k \oplus \kappa_k$ . Тут  $x = (x_1, \dots, x_m)$  – повідомлення, яке кодується, а  $y = (y_1, \dots, y_m)$  – закодоване повідомлення, яке А відправляє В для подальшого декодування. Цей метод кодування/декодування відомий як шифр Вернама.

#### **Протоколи розподілу секретного ключа.**

Оскільки ключ має бути секретним, важливою проблемою є знаходження способу його передачі (розподілу) обом учасникам, за якого ключ не може бути перехоплений або пошкоджений. Квантова криптографія пропонує такі способи (протоколи), надійність яких може бути в принципі як завгодно висока і забезпечується закономірностями квантової інформатики, такими як неможливість клонування квантового стану і додатковість між квантовим вимірюванням і збуренням стану.

Усі викладені нижче протоколи використовують той факт, що стани  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$  збурюються під час вимірювання в базисі  $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ , точніше, з імовірністю  $1/2$  переходять у стани  $|+\rangle$  або  $|-\rangle$ , і навпаки, стани  $|+\rangle$ ,  $|-\rangle$  під час вимірювання в базисі  $\{|0\rangle, |1\rangle\}$  переходять у стани цього базису.

Протокол BB84, запропонований Беннетом і Brassаром, можна модифікувати в наступні кроки:

1. Учасник А створює дві випадкові двійкові послідовності  $a = (a_1, \dots, a_N)$ ,  $b = (b_1, \dots, b_N)$  довжиною  $N = (4+\delta)n$ ,  $n \gg 1$ , також враховуючи, що кожен біт  $a_k$ ,  $b_l$  незалежний і має розподіл  $\{\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\}$ .

2. Учасник А створює чистий квантовий стан з вектором

$$\begin{aligned} |\phi\rangle &= \otimes_{k=1}^N |\phi_{a_k b_k}\rangle, \\ |\phi_{00}\rangle &= |0\rangle, & |\phi_{10}\rangle &= |1\rangle, \\ |\phi_{01}\rangle &= |+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle), & |\phi_{11}\rangle &= |-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle). \end{aligned}$$

3. Учасник А надсилає цей стан учаснику В відкритим квантовим каналом. Якщо канал ідеальний (шум або стороннє втручання відсутні), то В отримує стан  $|\psi\rangle\langle\psi|$ , в іншому разі – збурений стан  $E(|\psi\rangle\langle\psi|)$ , де  $E$  позначає дію каналу.

Учасник В генерує випадкову послідовність  $b' = (b_1', \dots, b_N')$  і на  $k$ -му кроці здійснює вимірювання в базисі  $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ , якщо  $b_k' = 0$ , або в базисі  $\{|+\rangle, |-\rangle\}$ , якщо  $b_k' = 1$ . Результати його вимірювань утворюють двійкову послідовність  $a' = (a_1', \dots, a_N')$ .

4. Учасник А надсилає послідовність  $b$  учаснику В через відкритий класичний канал. В порівнює  $b$  з  $b'$  і повідомляє А номери бітів, які співпадають ( $b_k = b_k'$ ).

Якщо канал ідеальний, то для цих бітів з імовірністю 1 виконується  $a_k = a_k'$ , бо вимірювання проводили в базисі, що містить надісланий стан. З великою ймовірністю кількість таких бітів майже дорівнює половині від  $N$ , що дорівнює  $(2 + \delta/2)n \geq 2n$ . Якщо кількість співпадаючих бітів  $a$  і  $a'$  значно відрізняється від  $2n$ , це означає можливість стороннього втручання у квантовий канал передачі. Тому учасники А і В припиняють передачу і намагаються усунути можливість втручання.

5. А і В виконують тести, щоб визначити величину втручання через можливий шум або підслуховування. Для цього А випадково обирає  $n$  бітів відфільтрованого ключа і передає їхні значення (разом з номерами) учаснику В через відкритий канал. Імовірність отримати  $\leq vn$  помилок у цих  $n$  контрольних бітах і при цьому  $\geq (v+\epsilon)n$  помилок у решті бітів має порядок  $\exp[-O(\epsilon^2 n)]$ . Тому за великих  $n$  можна вважати, що частка розбіжностей у цих секретних бітах, що залишилися, практично дорівнює  $v$ . Якщо А і В виявляють, що  $v$  перевершує деяке порогове значення  $v_t$ , то вони вирішують, що було втручання, і також припиняють цей раунд протоколу. Величина  $vt$  залежить від того, що відомо про можливість перехоплювача Е. У літературі наводять значення  $v_t = 0.11 \div 0.25$ , залежно від виду атак перехоплювача і використовуваних засобів протидії. Докладніше про це див. у [3].

6. Якщо встановлено, що  $v < v_t$ , то А і В здійснюють "узгодження інформації", щоб усунути неспівпадіння бітів, і "підвищення конфіденційності" залишковими  $\approx n$  бітами, щоб знищити інформацію, яку міг перехопити Е під час попередніх відкритих операцій. При цьому дуже корисною є верхня квантова оцінка кількості інформації перехоплювача Е. Останні операції відносяться до класичної інформатики. В результаті А і В отримують  $m \times n$  бітів спільного секретного ключа.

Покажемо, що у разі малих  $\delta$

$$P\{2n \leq (\#k: b_k = b_k') \leq (2 + \delta)n\} \geq 1 - 2\exp\left[-\frac{1}{8}n(\delta^2 + o(\delta^2))\right]. \quad (3.1)$$

Вводячи біт розбіжності  $v_k = b_k \oplus b_k'$ , маємо  $P\{v_k = 0\} = P\{v_k = 1\} = \frac{1}{2}$ ,

$Mv_k = \frac{1}{2}$ . Ймовірність, що нас цікавить, дорівнює  $(N = (4 + \delta)n)$

$$P\left\{2n \leq \sum_{k=1}^N v_k \leq (2 + \delta)n\right\} = 1 - 2P\left\{\sum_{k=1}^N (v_k < 2n)\right\},$$

унаслідок симетрії розподілу суми щодо її математичного очікування  $N/2 = (2 + \delta/2)n$ , у такому разі

$$P\left\{\sum_{k=1}^N v_k < 2n\right\} = P\left\{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^N\left(v_k - \frac{1}{2}\right) < -\varepsilon\right\},$$

де  $\varepsilon = \frac{1}{2} - \frac{2n}{(4+\delta)n} = \frac{1}{8}(\delta + o(\delta))$ . Зауважимо, що при використанні нерівності Чебишева, під час доведення закону великих чисел, впливає

$$P\left\{\left|\frac{1}{N}\sum_{k=1}^N\left(v_k - \frac{1}{2}\right)\right| > \varepsilon\right\} \leq \frac{Dv_k}{N\varepsilon^2} = \frac{1}{4N\varepsilon^2} \rightarrow 0$$

при  $N \rightarrow \infty$ . Експоненціальна оцінка (3.2), набагато точніша за експоненціальну, що впливає з нерівності Чернова:

$$P\left\{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^N\left(v_k - \frac{1}{2}\right) \leq -\varepsilon\right\} = P\left\{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^N\left(v_k - \frac{1}{2}\right) \geq \varepsilon\right\} \leq \exp\left[-2N\left(\varepsilon^2 + (\varepsilon^2)\right)\right]. \quad (3.2)$$

Це впливає з наступного. Нехай  $s > 0$ , тоді

$$\begin{aligned} P\left\{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^N\left(v_k - \frac{1}{2}\right) \geq \varepsilon\right\} &= P\left\{e^s \sum_{k=1}^N\left(v_k - \frac{1}{2}\right) \geq e^{sN\varepsilon}\right\} \leq e^{-sN\varepsilon} \text{Me}^s \sum_{k=1}^N\left(v_k - \frac{1}{2}\right) \\ &= e^{-sN\varepsilon} \left[\text{Me}^{s\left(v_k - \frac{1}{2}\right)}\right]^N = e^{-sN\varepsilon} \left[\cosh \frac{s}{2}\right]^N = e^{-N\left(s\varepsilon - \text{Incosh} \frac{s}{2}\right)}. \end{aligned}$$

При малих значеннях  $s$

$$\text{Incosh} \frac{s}{2} = \frac{s^2}{8} + o(s^2).$$

З іншого боку,

$$\max\left(s\varepsilon - \frac{s^2}{8}\right) = 2\varepsilon^2, s \geq 0,$$

до того ж максимум досягається для  $s = 4\varepsilon$ . Звідси отримуємо (3.2), а враховуючи, що  $N = (4 + \delta)n$ , маємо (3.1).

### Протокол В92 (додаткові дані).

1. Учасник А генерує випадкову двійкову послідовність  $a = (a_1, \dots, a_N)$  і на кожному кроці  $k$  створює чистий стан з вектором  $|\psi_0\rangle = |0\rangle$ , якщо  $a_k = 0$ , або  $|\psi_1\rangle = |+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ , якщо  $a_k = 1$ .

2. Учасник А відправляє стан, задаючи вектором  $|\phi\rangle = \otimes_{k=1}^N |\phi_{a_k}\rangle$ , учаснику В по відкритому квантовому каналу.

Учасник В генерує випадкову послідовність  $a' = (a'_1, \dots, a'_N)$ , у  $k$ -тому кроці виконує вимірювання у базисі  $\{|0\rangle|1\rangle\}$ , якщо  $a'_k = 0$ , або у базисі  $\{|+\rangle|-\rangle\}$ , якщо  $a'_k = 1$ . Східний плюс кодується як 0, мінус як 1. Таким чином, результат вимірювання В утворює двійкову послідовність  $b = (b_1, \dots, b_N)$ . Слід також зазначити, що  $a_k = a'_k$ , тоді  $b_k = 0$ , тому з  $b_k = 1 \Rightarrow a_k \neq a'_k$ , тобто  $a_k = 1 - a'_k$ .

3. Учасник В відправляє послідовність  $b$  учаснику А по відкритому класичному каналу. А (відповідно В) залишає тільки ті біти послідовності  $a$  (відповідно  $a'$ ), для яких  $b_k = 1$ . Отримані таким чином таємні біти  $a_k = 1 - a_k'$  складають відфільтрований ключ.

4. Наступні кроки аналогічні відповідним крокам протоколу BB84.

**Протокол E91.**

Учасники А і В отримують "половинки" зчепленого стану

$$|\phi\rangle = \otimes_{k=1}^N |\phi_{a_k}\rangle$$

$$\text{де: } |\phi_k\rangle = \frac{1}{2}(|100\rangle + |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|++\rangle + |--\rangle), \tag{3.3}$$

де перший  $q$ -біт надсилається учаснику А, а другий – В.

Учасник А генерує випадкову двійкову послідовність  $a = (a_1, \dots, a_N)$ . На  $k$ -му кроці А проводить вимірювання в базисі  $\{|0\rangle, |1\rangle$ , якщо  $a_k = 0$ , або в базисі  $\{|+\rangle, |-\rangle$ , якщо  $a_k = 1$ , та отримує результати  $a' = (a'_1, \dots, a'_N)$ . Відповідно В генерує послідовність  $b = (b_1, \dots, b_N)$ , вимірює в базисі, обраному за  $b_k$ , і отримує результати  $b' = (b'_1, \dots, b'_N)$ .

З рівності (3.3) випливає, що якщо на  $k$ -му кроці А і В проводять вимірювання в однакових базисах:  $\{|0\rangle, |1\rangle$  або  $\{|+\rangle, |-\rangle$ , то вони отримують співпадаючі результати,  $P\{a'_k = b'_k\} = 1$ .

Використовуючи відкритий класичний канал, А і В порівнюють  $a$  і  $b$  і залишають у відфільтрованому ключі тільки ті біти  $a'$  (відповідно  $b'$ ), для яких  $a_k = b_k$ , тобто А і В використовували для  $k$ -го вимірювання однакові базиси. У цьому протоколі біти просіяного ключа  $a'_k = b'_k$  не просто відбирають, але створюють під час вимірювань.

Описані вище протоколи реалізовано в експерименті; більше того, для перших двох створено комерційні зразки обладнання. Доведення їхньої стійкості є непростим завданням, яке вимагає залучення всього інструментарію квантової теорії інформації.

**Висновки**

Гібридне використання інтелектуального аналізу станів ККЗ на основі нейронної мережі та криптографічних протоколів при створенні стійких ключів безпечного шифрування дає прийнятний результат по захисту квантових каналів від кіберзламів.

Інформаційна та математична модель, що розроблена авторами, дає згортку інформаційного простору до рівня, який можна обчислити. Кортж інформаційної моделі містить замкнуті математичні вирази та відображення, що є гладкими та не мають розривів і, таким чином, можуть бути похідними, що необхідно для розрахунків ваг зв'язків в нейронній мережі.



## REFERENCES

1. Huang, D., Chen, Z., Guo, Y., & Lee, M. (2007). Quantum Secure Direct Communication Based on Chaos with Authentication. *Journal of the Physical Society of Japan*, 76(12), 124001.
2. TLS (Channel SSP) changes in Windows 10 and Windows Server. (2018). Microsoft. Docs. Retrieved May 09, 2020 from <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-server/security/tls/tls-schannel-ssp-changes-in-windows-10-and-windows-server>
3. Valiev, K.A., & Kokin, A.A. (2004). *Kvantovie kompyuteri: nadezhdi i realnost [Quantum Computers: Hopes and Reality]* (2nd ed.). Moscow: IKI [in Russian].
4. Hiai, F. & Petz, D. (1991). The proper formula for relative entropy and its asymptotics in quantum probability. *Commun. Math. Phys.* 143, 99.
5. A Quantum information processing and quantum error correction: An engineering approach. (2012). Elsevier. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/c2010-0-66917-3>
6. Information and Computation: Classical and Quantum Aspects. (2001). Reviews of Modern Physics to appear. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0112105>
7. Shifrin, T., & Adams, M. (n.d.). *Linear Algebra and Geometry*. W. H. Freeman.
8. von Neumann, J. (1955). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (1st Edition). Princeton University Press.
9. Nielsen, M., & Chuang, I. (2011). *Quantum Computation and Quantum Information* (10th Anniversary Edition). Cambridge University Press.
10. Faddeev, L.D., & Ākubovskii, O.A. (2009). *Lectures on Quantum Mechanics for Mathematics Students*. American Mathematical Soc.
11. Sands, M., & Feynman R.P. (2011). *The Feynman Lectures on Physics, Vol. III*. Basic Books; New Millennium ed. edition.
12. Khatri, S., & Wilde, M. M. (2020). Principles of Quantum Communication Theory: A Modern Approach. arXiv:2011.04672.
13. Giroti, I., & Malhotra, M. (2022). Quantum Cryptography: A Pathway to Secure Communication. In 6th International Conference on Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS) (2022, №6, p. 279).
14. Regula, B., Lami, L., & Wilde, M.M. (2022). Postselected quantum hypothesis testing. arXiv:2209.10550.
15. Bierbrauer, J. (2016). *Introduction to Coding Theory* (2nd Edition). New York.
16. Lami, L. & Shirokov, M.E. (2021). Attainability and lower semi-continuity of the relative entropy of entanglement, and variations on the theme. arXiv:2105.08091.
17. Watrous, J. (n.d.). The theory of quantum information. Retrieved from <http://cs.uwaterloo.ca/~watrous/TQI/TQI.pdf>

*Стаття надійшла до редакції 07.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 09.08.2024*

*The article was received 07.05.2024 and was accepted after revision 09.08.2024*

### **Зінченко Володимир Леонідович**

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6081-4848> **e-mail:** [zinchenko@outlook.com](mailto:zinchenko@outlook.com)

### **Лифар Володимир Олексійович**

д.т.н., професор, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

**Адреса робоча:** вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7860-9663> **e-mail:** [lifar@snu.edu.ua](mailto:lifar@snu.edu.ua)

УДК 004.89:519.22](043.3)

**Oleksii Zarudnii**, PhD student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-7462-3899> *e-mail*: [oleksii.zarudnyi@gmail.com](mailto:oleksii.zarudnyi@gmail.com)

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

## **USAGE OF INTELLECTUAL ANALYSIS OF ECOLOGICAL-ECONOMIC DATA IN THE PENSION INSURANCE SYSTEM AND FOR FORECASTING EXPENDITURES ON SOCIAL PROTECTION AND SOCIAL SECURITY**

***Abstract.** The paper is devoted to an actual scientific and applied problem – the development of methodology for applying mathematical models and data mining methods for actuarial calculations in mandatory state pension insurance system. The paper describes methodology for modeling changes in the number of pension recipients taking into account the impact of environmental factors, in particular air pollution. The basis of the proposed method is a multi-model approach, characterized by combination of data mining and probabilistic models in the form of Bayesian network, which are appropriate in conditions of statistical, parametric and structural uncertainty.*

*The proposed approach describes the change in number of pension recipients, in particular for disability and breadwinner loss, under influence of air pollution from organic and inorganic compounds. The scientific novelty of the paper is in the use of an ensemble of models including probabilistic and statistical models in the form of Bayesian network and regression models, in the system of actuarial calculations of mandatory state pension insurance.*

*The paper considers several scenarios for the impact of pollutants on the growth of number of pension recipients. The indicator of the share of expenditures on social protection and social security of the population in the gross national product was chosen as the target variable of the process under study. Mathematical models were found to be adequate to the modeling process, and the Bayesian network classification error is about 20%. The model structure is built in Genie 2.0 modeling system. The principal component analysis, is used to reduce the data dimension. The proposed methodology can also be applied to other tasks of forecasting social protection and social security expenditures.*

***Key words:** expenses for social protection and social security, air pollution, Bayesian network, principal component analysis, the system of actuarial calculations.*

---

© О.Б. Зарудний, 2024

**О.Б. Зарудний**

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

## **ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ ДАНИХ У СИСТЕМІ ПЕНСІЙНОГО СТРАХУВАННЯ ТА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИТРАТ НА СОЦІАЛЬНИЙ ЗАХИСТ І СОЦІАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

***Анотація.** Стаття присвячена актуальній науково-прикладній проблемі – розробці методики застосування математичних моделей та методів інтелектуального аналізу даних для актуарних розрахунків у системі загальнообов'язкового державного пенсійного страхування. В роботі описано методику моделювання зміни контингенту одержувачів пенсій за урахування впливу екологічних чинників, зокрема забрудненості повітря. Основу запропонованої методики становить багатомодельний підхід, особливістю якого є поєднання інтелектуального аналізу даних та ймовірнісних моделей у формі мереж Байєса, застосування яких є доцільним в умовах статистичної, параметричної та структурної невизначеності.*

*Пропонований підхід описує зміну контингенту одержувачів пенсій, зокрема по інвалідності та по втраті годувальника, під впливом екологічних чинників – зміни забруднення повітря органічними та неорганічними сполуками. Науковою новизною роботи є застосування ансамблю моделей, до якого входять ймовірнісно-статистичні моделі у формі мереж Байєса та регресійні моделі, у системі актуарних розрахунків загальнообов'язкового державного пенсійного страхування.*

*В роботі розглянуто декілька сценаріїв впливу забруднюючих речовин на зростання контингенту одержувачів пенсій. В якості цільової змінної досліджуваного процесу обрано показник частки видатків на соціальний захист та соціальне забезпечення населення у валовому національному продукті. Математичні моделі виявилися адекватними обраному для моделювання процесу, помилка класифікації мереж Байєса становить близько 20%. Структуру моделі побудовано в системі моделювання Genie 2.0. Для зменшення розмірності даних застосовано метод головних компонент. Пропонована методика може бути застосована і для інших задач прогнозування витрат на соціальний захист та соціальне забезпечення.*

***Ключові слова:** витрати на соціальний захист та соціальне забезпечення, забруднення повітря, мережа Байєса, метод головних компонентів, система актуарних розрахунків.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.161-176>

### **Вступ**

Питання використання математичних моделей, методів інтелектуального аналізу даних тощо у актуарних розрахунках та для прогнозування державних видатків на соціальний захист та соціальне забезпечення, незважаючи на значну кількість досліджень, представлених у роботах вітчизняних та закордонних фахівців [1–9], залишається не вирішеним. Перш за все, це пов'язано із значною кількістю факторів, зокрема демографічних чинників, поточною соціально-економічною ситуацією в країні, наслідками військового конфлікту, що впливають на обсяги видатків, крім того, необхідно враховувати й особливості чинного законодавства. Крім того, останнім часом в публікаціях

міжнародних організацій, роботах науковців, пов'язаних із соціальним забезпеченням та соціальним захистом населення, особлива увага приділяється оцінюванню економічного впливу смертності та захворюваності внаслідок впливу екологічних факторів та кліматичних змін [8, 9]. Як зазначається у підсумковому звіті «Вплив на здоров'я та соціальні витрати, пов'язані із забрудненням повітря у великих містах України» [9], виконаному в рамках Програми розвитку ООН в Україні, «у великих містах України, де якість повітря явно не оптимальна, покращення якості повітря до рівня, що вважається «хорошим», могло б запобігти третині випадків усіх інсультів і випадків хронічної обструктивної хвороби легень» [9]. За даними проєкту «Світовий індекс якості повітря» [10], у 2019 році 42 900 передчасних смертей і 953 500 років життя з поправкою на інвалідність (DALY) були пов'язані з впливом PM<sub>2,5</sub>, а за даними Глобального тягаря хвороб (GBD), це відповідає близько 10% всіх випадків захворюваності та смертності. Тому актуальною є задача урахування екологічної складової у актуарних розрахунках у системі загальнообов'язкового державного пенсійного страхування та для прогнозування витрат на соціальний захист та соціальне забезпечення. Що в свою чергу потребує розроблення відповідного аналітичного інструментарію.

Для розв'язання даної задачі запропоновано методику використання інтелектуального аналізу даних та математичного моделювання (ансамблів моделей, зокрема таких, що поєднують ймовірнісні моделі у формі мереж Байєса та регресійні моделі) для розширення переліку вхідних показників для проведення актуарних розрахунків за рахунок включення у модель еколого-економічних чинників – показників забруднення повітря.

Отже, тема роботи є актуальною, має практичну значущість та наукову новизну.

## **Постановка задачі**

Метою дослідження є удосконалення існуючих методик прогнозування витрат на соціальний захист та соціальне забезпечення.

Задачі дослідження:

- виконати огляд сучасних методів моделювання та прогнозування витрат на соціальний захист та соціальне забезпечення в умовах невизначеності, спричиненої впливом різних груп чинників, в тому числі екологічних;
- проаналізувати дані, що використовуються для аналізу та прогнозування актуарних розрахунків у системі загальнообов'язкового державного пенсійного страхування;
- розробити методику побудови комп'ютерних моделей для опису та прогнозування чинників, що впливають на зростання видатків на соціальний захист та соціальне забезпечення в умовах невизначеності, спричиненої погіршенням екологічної ситуації у країні, зокрема зростанням забрудненості повітря органічними та неорганічними сполуками;
- удосконалити методику моделювання кількості одержувачів пенсій, зокрема пенсій по інвалідності в умовах зростання забрудненості повітря органічними та неорганічними сполуками;
- побудувати ймовірно-статистичні моделі у формі мережі Байєса, які описують вплив екологічних чинників на динаміку контингенту одержувачів пенсій;
- виконати апробацію розробленої методики на статистичних даних;

- проаналізувати якість прогнозів, отриманих за побудованими моделями, зробити висновки щодо можливості їх використання у роботі установ та організацій системи соціального захисту та соціального забезпечення;
- запропонувати шляхи покращення та практичного застосування вказаної методики.

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

Питання розроблення сучасного аналітичного інструментарію, призначеного до використання при проведенні актуарних розрахунків у системі пенсійного забезпечення та прогнозуванні витрат на соціальний захист і соціальне забезпечення, є актуальним для багатьох країн, про що свідчить значна кількість публікацій як фахівців-актуаріїв, так і науковців [1–9, 11–14]. Багато методик передбачають використання регресійних, економічних та макроекономічних моделей тощо, які призначені до використання у країнах із сталим економічним розвитком, усталеною системою пенсійного забезпечення та соціального захисту населення. Адаптувати вказані методики до використання в Україні в повній мірі практично не можливо, адже країна охоплена війною, що значно та швидко збільшує витрати на соціальний захист та соціальне забезпечення, тривають реформи системи пенсійного забезпечення та соціального захисту, країна є географічно великою, її регіони мають різний рівень соціально-економічного розвитку, а деякі з них знаходяться у зоні активних бойових дій. Іншим, не менш проблемним, є питання збору статистичних даних, достовірності отриманої інформації, необхідної для побудови складних моделей, використовуваних у актуарних розрахунках у системі державного пенсійного забезпечення. Тому потрібні нові, дещо спрощені підходи до виконання актуарних розрахунків у системі загальнообов'язкового державного пенсійного страхування, прогнозування витрат на соціальний захист та соціальне забезпечення. Зокрема, у дослідженні «Глобальний тягар хвороб» [15] запропонована статистична модель, у якій враховано, що внаслідок погіршення стану здоров'я і ймовірного настання інвалідності людина втрачає можливість брати активну участь у соціально-економічних процесах і робити свій внесок, що впливає як на збільшення соціальних витрат, так і на втрати людського капіталу, а також і на економічне зростання країни. Дане дослідження вирізняється тим, що в ньому використані регресійні моделі, які відображають вплив 87 факторів ризику, і найбільш вагомими з них виявились показники забруднення повітря. З огляду на поточну екологічну ситуацію в Україні та зростання рівня забрудненості повітря внаслідок бойових дій, урахування еколого-економічних чинників у задачі прогнозування витрат на пенсії, соціальний захист та соціальне забезпечення є обґрунтованим та доцільним.

### **Теоретичні основи дослідження**

Методика проведення актуарних розрахунків у системі загальнообов'язкового державного пенсійного страхування, затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2004 року №1677 [16], яка врегульовує, в тому числі, й питання побудови коротко-, середньо- та довгострокового прогнозів фінансового стану пенсійної системи. Також, в ній визначається, що у системі проведення актуарних розрахунків використовуються методики, які «базуються на поєднанні методів теорії імовірності, математичного аналізу,

математичної статистики, теорії стохастичного аналізу, теорії складних відсотків, диференційних рівнянь та оптимізації». В сучасних умовах, що характеризуються наявністю невизначеностей різного типу, динамічним перебігом подій, необхідністю роботи з короткими вибірками різнорідних показників, важливо забезпечити системність використання різних методів аналізу, обробки даних, урахування можливих сценаріїв розвитку ситуації, вирішувати задачі прогнозування та підтримки прийняття рішень [17].

Одним із шляхів вирішення даної проблеми є впровадження багатомодельного підходу, оснований на поєднанні інтелектуального аналізу даних, використанні регресійних моделей, ймовірнісно-статистичних методів, сценарного аналізу, методів експертних оцінок тощо [17, 18].

Регресійні моделі широко застосовують для аналізу та прогнозування процесів різної природи [17, 19]. Методики їх використання представлені у багатьох роботах як закордонних, так і вітчизняних фахівців [19–24]. Основною перевагою даного підходу є простота, що й зумовило його використання для виявлення зв'язків в даних, тестування гіпотез, аналізу та прогнозування часових рядів тощо. У регресійному аналізі вирізняють аналітичний підхід та прогнозування. За прогнозного підходу знаходять найбільш значимі параметри моделей, а за аналітичного – досліджують силу та напрям зв'язків між регресорами та відгуком.

Регресійний аналіз часто застосовують разом із кореляційним аналізом, інколи навіть застосовують термін «кореляційно-регресійний аналіз», оскільки ці методи доповнюють один одного. Однак, якщо за допомогою кореляційного аналізу досліджується напрямок та щільність зв'язку між незалежними змінними, то в регресійному аналізі досліджується форма залежності між незалежними змінними.

У спеціалізованій літературі регресію визначають як залежність математичного очікування (середнього значення) [19, 23] незалежної змінної від однієї або декількох інших змінних.

Нехай, у точках  $x_n$  незалежної змінної  $x$  отримані виміри  $Y_n$  [22], і потрібно знайти залежність середнього значення величини  $\bar{Y}$  від величини  $x$ , тобто, маємо

$$\bar{Y}(x) = f(x|a),$$

де  $a$  – вектор невідомих параметрів  $a_i$  [22].

Функція  $f(x|a)$  – це функція регресії. Припускають, що  $f(x|a)$  є лінійною функцією параметрів  $a$ , має вигляд (1) [32]:

$$f(x|a) = \sum_{i=1}^l a_i \varphi_i(x), \quad (1)$$

де  $f_i(x)$  – задані функції.

Тоді, матрицю  $A_{ni} = f_i(x_n)$  називають регресійною матрицею [22].

Для визначення параметрів  $a_i$  зазвичай використовують метод найменших квадратів [22].

При пошуку функції регресії у вигляді (1) необхідно визначити кількість членів  $I$  у сумі (1).

Якщо  $I$  – мале, не можна досягти прийняттого опису  $\bar{Y}(x)$ , якщо велике – є ризик виникнення великих статистичних помилок функції регресії [22].

Парні лінійні регресійні моделі описують лінійну залежність між двома змінними [22]. У загальному випадку парна вибіркова регресійна модель [19] має вигляд (2):

$$Z = a_0 + a_1X + E, \quad (2)$$

де  $Z$  – вектор значень залежної змінної,  $Z = [z_1, z_2, \dots, z_n]$ ;  $X$  – вектор значень незалежної змінної  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ ;  $a_0, a_1$  – невідомі параметри регресійної моделі;  $E$  – вектор значень випадкових величин  $E = [e_1, e_2, \dots, e_n]$ , його наявність зумовлена випадковими збуреннями, недосконалою структурою моделі, похибками вимірів та неточністю обчислень оцінок параметрів моделі.

Для дослідження зв'язку між  $k + 1$  змінними ( $k$  регресорів плюс один відгук) використовують  $k$  –мірну поверхню для прогнозування, тобто, у загальному випадку в модель регресії можна включати і більш складні зв'язки – квадратичні, кубічні, поліноміальні, перетин змінних [19].

Рівняння регресії із нелінійним зв'язком відгуку та регресорів має вигляд (3):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_1^2 + \beta_3 \cdot X_2 + \beta_4 \cdot X_2^2 + \varepsilon. \quad (3)$$

Модель множинної лінійної регресії, на відміну від моделі лінійної регресії, дозволяє досліджувати зв'язки з декількома регресорами, що, звичайно, ускладнює вибір кращої моделі та подальшу її інтерпретацію, але створює умови для виявлення складніших залежностей.

Як зазначають [17, 25], при побудові моделей еколого-соціально-економічних процесів кращі результати можна отримати, використовуючи ансамблі моделей (при багатомодельному підході). Тобто в умовах, які характерні для більшості соціально-еколого-економічних систем, коли задачу складно формалізувати, а явище чи процес описує значна кількість чинників, серед яких важко визначити найбільш значимі та встановити причинно-наслідкові зв'язки між вхідними даними та вихідними показниками, а прогнози їх розвитку є підґрунтям для прийняття важливих управлінських рішень. Кращі результати, як зазначають [17], отримані за використання ансамблів моделей, до складу яких входять регресійні моделі в поєднанні із мережами Байеса, деревами рішень, когнітивними моделями.

Використання мереж Байеса, як зазначають фахівці [26–32], актуальне, якщо необхідно побудувати адекватну модель, в умовах, коли відсутня вичерпна інформація про досліджуване явище чи об'єкт, силу та характер впливу на них внутрішніх та зовнішніх чинників, їх динаміку, взаємодію з іншими процесами та системами.

Мережа Байеса являє собою пару [32]  $\langle G, B \rangle$ , де  $G$  – це направлений ациклічний граф, а  $B$  – це множина параметрів, які визначають мережу, або множина таблиць умовних ймовірностей вершин:  $P = P(X^{(i)} | pa(X^{(i)}))$ ,  $i = 1 \dots N$  для кожного можливого значення  $x^{(i)} \in X^{(i)}$  та  $pa(X^{(i)}) \in Pa(X^{(i)})$ , де  $Pa(X^{(i)})$  – множина батьків змінної  $X^{(i)} \in G$ .

Кожна змінна  $X^{(i)} \in G$  є вершиною мережі Байєса. Повна спільна ймовірність БМ обчислюється за формулою (4) [32]:

$$P(X^{(1)}, \dots, X^{(N)}) = \prod_{i=1}^N P(X^{(i)} | Pa(X^{(i)})). \quad (4)$$

З математичної точки зору, мережа Байєса – це модель подання існуючих і не існуючих імовірнісних залежностей. При цьому зв'язок  $A \rightarrow B$  є причинним, коли подія  $A$  – причина виникнення  $B$ , тобто коли існує механізм, відповідно до якого значення, набуте  $A$ , впливає на значення, набуте  $B$ .

Правило Байєса [32] має вигляд (5):

$$P(H | E) = \frac{P(E | H) \cdot P(H)}{P(E)}. \quad (5)$$

Дана залежність описує причинно-наслідкові зв'язки між спостереженнями та гіпотезами. Ймовірності  $p(H)$  та  $p(E | H)$  є апіорними, тобто задаються до початку спостережень, а ймовірність  $P(H | E)$  є апостеріорною.

Переваги байєсівського методу полягають в тому, що апіорні ймовірності можна уточнювати (оновлювати), відповідно до характеру перебігу досліджуваного процесу, що дає можливість уточнювати ймовірності подій за надходження додаткової інформації.

Головне припущення теорії побудови мереж Байєса полягає в тому, що події є вичерпними ( $\bigcup_{i=1}^n H_i = \Omega$ ) і не перетинаються (6). При виконанні цих умов ймовірність події  $E$  можна обчислити за допомогою умовних ймовірностей.

$$p(E) = \sum_{i=1}^n p(E \cap H_i) = \sum_{i=1}^n p(E | H_i) \cdot p(H_i). \quad (6)$$

Підставивши даний вираз в формулу (4), отримаємо формулу, яка є основою для побудови мереж Байєса (7) [32]:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k) \cdot p(H_k)}{\sum_{i=1}^n p(E | H_i) \cdot p(H_i)}. \quad (7)$$

Побудова мережі Байєса охоплює комплекс задач, зокрема, пошук оптимальної структури мережі [29] – направлено ациклічного графа, що найбільш адекватно відповідає навчальним даним або досліджуваному процесу, обчисленням значень таблиць умовних ймовірностей для кожної вершини графа.

Інформацію про топологію графа (структуру) і параметри кожної вершини можна отримати з навчальних даних. Найбільш складною задачею є отримання топології мережі. Особливо складно отримати правильну топологію у випадку, коли деякі вершини приховані або дані є некоректними чи неповними.



Для виконання точних розрахунків, пов'язаних з вибором моделі, необхідно обчислити  $P(D) = \sum_G P(D | G)$ , що є задачею експоненційної складності.

Для вирішення цієї проблеми застосовують байєсовий інформаційний критерій (8) [32]:

$$\log(P(G | D)) \approx \log(P(D | G, \hat{\theta}_G)) - \frac{\log(N)}{2} \cdot \dim(G), \quad (8)$$

де  $N$  – число моделей,  $\dim(G)$  – розмір моделі (кількість вільних параметрів),

$\hat{\theta}_G$  – максимально правдоподібна оцінка параметрів,  $-\frac{\log(N)}{2} \dim(G)$  – штрафуюча компонента за надмірну складність моделі.

Оскільки формула Байєса, фактично, є моделлю раціонального вибору в умовах неточної або неповної інформації, що особливо актуально для даного дослідження, що й зумовило вибір мереж Байєса до використання у складі ансамблю моделей.

Отже, обрані до використання у даному дослідженні методи та моделі є популярними методами інтелектуального аналізу даних і можуть бути ефективно використані для дослідження факторів, що впливають на обсяги видатків на соціальний захист та соціальне забезпечення, виявлення зв'язків в даних, в тому числі, й прихованих, та дають змогу передбачити позитивний (негативний) вплив окремих чинників тощо. Все це дозволить покращити якість управлінських рішень, оптимальніше використовувати наявні фінансові ресурси.

### Методика дослідження

Дослідження виконано на матеріалах Державної служби статистики України [33] та порталу «Відкриті дані» [34]. Всього розглянуто 50 показників, що стосуються пенсійного забезпечення, соціально-економічного розвитку та екології. У дослідженні використано математичні моделі та методи інтелектуального аналізу для підготовки даних, виявлення закономірностей, відбору найбільш значимих показників та для прогнозного моделювання.

Основними етапами методики є:

1. Збір та попередня обробка статистичних показників, відбір найбільш значимих для дослідження.
2. Типологічне групування вхідних даних.
3. Зменшення простору вхідних змінних (метод головних компонент) для кожної групи даних.
4. Відбір регресорів та побудова регресійних моделей.
5. Оцінювання якості прогнозів, побудованих за різними моделями, вибір кращої моделі.
6. Побудова мережі Байєса для оцінювання різних сценаріїв впливу екологічних чинників на зміну витрат на пенсійне забезпечення.
7. Аналіз побудованих сценаріїв.
8. Підготовка варіантів управлінських рішень.

## Результати дослідження

Вхідними даними є державні видатки на соціальний захист та соціальне забезпечення, макроекономічні показники, такі як валовий внутрішній продукт, індекс споживчих цін, демографічні показники та екологічні – стан забруднення повітря різними органічними та неорганічними сполуками в розрахунку на одну особу населення. Перелік показників представлений у табл. 1.

Таблиця 1. Перелік змінних, використаних у роботі

Позначення	Показник
Target	Державні видатки на соціальний захист та соціальне забезпечення, % до ВВП
x01	Всього, населення тис. чол.
x02	Середня очікувана тривалість життя при народженні (обидві статі), роки
x03	Індекс споживчих цін, %
x04	Валовий внутрішній продукт, тис. грн
x05	Чисельність пенсіонерів (на початок року), тис. чол.
x06	Чисельність одержувачів пенсій за віком, тис. чол.
x07	Чисельність одержувачів пенсій по інвалідності
x08	Чисельність одержувачів пенсій по втраті годувальника
x09	Чисельність одержувачів пенсій за вислугу років, тис. чол.
x10	Чисельність одержувачів соціальних пенсій, тис. чол.
x11	Чисельність отримувачів довічного утримання суддів, чол.
x12	Викиди речовин у вигляді суспендованих твердих частинок на одну особу, кг
x13	Викиди речовин у вигляді суспендованих твердих частинок більше 2,5 мкм та менше 10 мкм на одну особу, кг
x14	Викиди речовин у вигляді суспендованих твердих частинок 2,5 мкм та менше на одну особу, кг
x15	Викиди діоксиду азоту на одну особу, кг
x16	Викиди аміаку на одну особу, кг
x17	Викиди діоксиду сірки на одну особу, кг
x18	Викиди оксиду вуглецю на одну особу, кг
x19	Викиди неметанових летких органічних сполук на одну особу, кг

Фактори, представлені в табл. 1, було розподілено на три групи, що відповідають напрямкам – пенсійне забезпечення, макроекономіка, екологія. Для групи змінних, що описують чисельність одержувачів пенсій (змінні  $x_5$ – $x_{11}$ ) методом головних компонент [35], зменшується простір вхідних змінних. Визначено, що два головних компоненти описують 80% інформації про пенсійне забезпечення.

Для групи екологічних чинників (змінні  $x_{12}$ – $x_{19}$ ), використовуючи метод головних компонент, визначено дві змінні, вони описують 80% інформації про викиди шкідливих речовин та забруднення повітря.

Для визначення характеру залежностей у даних, що використовуються у дослідженні, була побудована серія регресійних моделей. Змінні, які мають бути використані для побудови фінальної моделі, визначено на основі значення  $p$ -значення статистики  $\chi^2$ -квадрат для оцінок коефіцієнтів моделі у вигляді лінійної регресії. В якості критичного значення міри рівня довіри використано 10%.

Кращою серед побудованих моделей виявилась модель, регресорами якої є середня очікувана тривалість життя при народженні (обидві статі) ( $x_2$ ), індекс споживчих цін ( $x_3$ ), валовий внутрішній продукт ( $x_4$ ), головна компонента, що описує кількість одержувачів пенсій (Pension), головна компонента, яка описує макроекономічні показники (Econom), головна компонента (Emissions) описує екологічні чинники. Статистичні характеристики побудованої моделі: коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,81$ , скорегований коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,71$ , середньоквадратична похибка RMSE = 0,52, середня абсолютна процентна похибка MAPE = 4,92%. Тобто, відхилення реального значення від прогнозованого становить, в середньому, 4,92% (рис. 1).

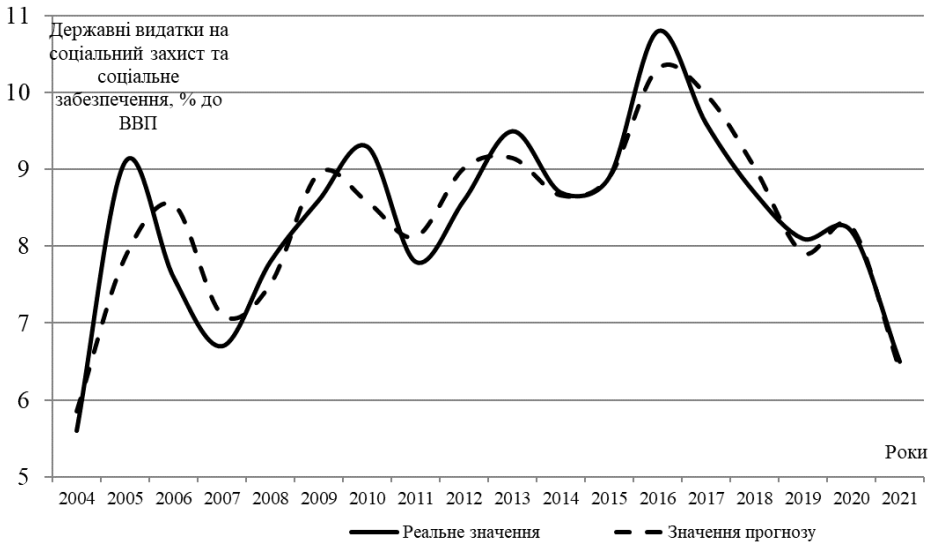


Рис. 1. Прогнозовані та реальні значення показника частки державних витратків на соціальний захист та соціальне забезпечення у ВВП, %

Отже, як видно з табл. 2, усі значення  $Pr > |t|$  менші 0,1, тобто при значенні міри рівня довіри 10% модель валідна.

Для побудови мережі Байєса (рис. 2) було використано програмне забезпечення Genie 2 [36]. Побудова топології мережі здійснювалась в автоматичному режимі із використанням алгоритму Greedy Thick Thinning (модифікація алгоритму K2).

Були накладені обмеження: кожна вершина-нащадок може мати не більше восьми батьківських вершин. Статистичні характеристики побудованої моделі – похибка помилкової класифікації (MISC) дорівнює 20%.

Таблиця 2. Значення оцінок коефіцієнтів моделі

Оцінка параметра моделі					
Змінна	Кількість ступенів свободи	Оцінка параметра моделі	Стандартна похибка	Значення $t$ -статистики Стьюдента	$p$ -значення статистики $\chi^2$ -квадрат
Вільний член	1	71.28906	26.36255	2.70	0.0205
$x_2$	1	-0.73005	0.34617	-2.11	0.0587
$x_3$	1	-0.07780	0.02516	-3.09	0.0103
$x_4$	1	-0.00000147	4.53494E-7	-3.24	0.0079
Pension	1	-1.46774	0.70558	-2.08	0.0617
Econom	1	1.36263	0.40293	3.38	0.0061
Emissions	1	-1.92650	0.61879	-3.11	0.0099

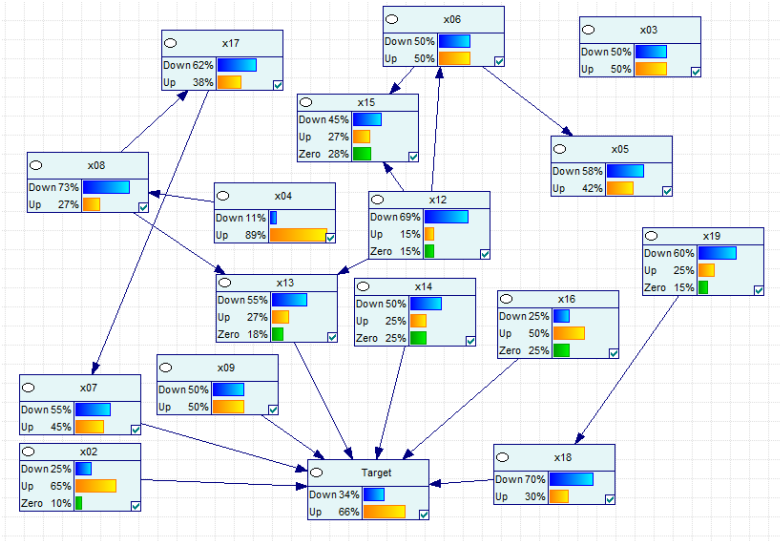


Рис. 2. Топологія мережі Байеса для моделювання сценаріїв впливу забруднення повітря на зростання обсягів витратів на пенсійну складову витрат на соціальний захист та соціальне забезпечення

Як показало дослідження, виконане із використанням мережі Байеса, представленої на рис. 2, можна розглянути декілька сценаріїв. Один із варіантів – збільшені кількості одержувачів пенсій по інвалідності за збільшення рівня забруднення повітря речовинами у вигляді суспендованих твердих частинок різного розміру. В цьому випадку, ймовірність збільшення частки державних витратків на соціальний захист та соціальне забезпечення у ВВП збільшується до 75%. За іншого, менш ймовірного сценарію, при зменшенні рівня забруднення повітря речовинами у вигляді суспендованих твердих частинок різного розміру, кількості пенсій по інвалідності, по втраті годувальника ймовірність зменшення частки державних витратків на соціальний захист та соціальне забезпечення у ВВП зменшується до 49%.

## Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведення актуарних розрахунків у системі загальнообов'язкового державного пенсійного страхування врегульоване чинним законодавством та базується на поєднанні методів теорії імовірності, математичного аналізу, математичної статистики, теорії стохастичного аналізу, теорії складних відсотків, диференційних рівнянь та оптимізації. В даному дослідженні запропоновано нову методику прогнозного моделювання, яка передбачає використання ансамблів моделей, може бути застосована у існуючій системі аналізу та прогнозування витрат на соціальний захист та соціальне забезпечення, в тому числі й для проведення актуарних розрахунків у системі загальнообов'язкового державного пенсійного страхування. Як свідчать результати виконаного дослідження, прийнятних результатів прогнозування державних витрат на соціальний захист та соціальне забезпечення можна досягти завдяки застосуванню запропонованої методики, в основу якої покладено ансамбль з регресійних моделей та байєсівських мереж.

Серед регресійних моделей кращою виявилась комбінована модель із включенням регресорів за методом backward selection [5], коли з повної моделі вилучаються регресори, для яких  $p$ -значення статистики  $\chi^2$ -квадрат більше за 0,1. Причому для пониження розмірності груп вхідних регресорів – кількість одержувачів пенсій, макроекономічні показники, екологічні чинники, було використано метод головних компонентів, за результатами роботи якого в модель було включено отримані головні компоненти, які враховують варіабельність даних більшу за 80%. Для побудованої фінальної моделі у вигляді регресії на головних компонентах отримано статистичні характеристики – коефіцієнт детермінації 0,81, середньоквадратична похибка 0,52, середня абсолютна процентна похибка 4,92%. Тобто в середньому на кожному кроці при прогнозуванні за отриманою моделлю реальне значення відрізняється від прогнозу на 4,92%.

У подальших дослідженнях для прогнозного моделювання доцільно застосовувати ансамблі різнотипних моделей, зокрема регресійні моделі та мережі Байєса у поєднанні, наприклад, з методом групового врахування аргументів, штучним інтелектом та іншими методами і моделями інтелектуального аналізу даних.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дубініна С.В., Бідюк П.І. (2017). Застосування методів інтелектуального аналізу даних до розв'язання задач актуарного моделювання та оцінювання фінансових ризиків. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 1. 49–64 doi: 10.20535/SRIT.2308-8893.2017.1.04
2. Czernicki D. How cloud computing transforms actuarial modeling infrastructure. Retrieved from: [https://www.ey.com/en\\_us/insights/insurance/cloud-computing-implications-for-actuarial-modeling](https://www.ey.com/en_us/insights/insurance/cloud-computing-implications-for-actuarial-modeling)
3. Larochelle J.-P., Carlson P., Cote V. C., Lu Y., Shapiro N., Tam A., Thusu V., Zhang A. (2023). *Predictive Analytics and Machine Learning. Practical Applications for Actuarial Modeling (Nested Stochastic)*. Schaumburg: Society of Actuaries. Research Institute. Retrieved from <https://www.soa.org/49ae74/globalassets/assets/files/resources/research-report/2023/predictive-analytics-and-machine-learning.pdf>

4. Iyer S. Stochastic Actuarial Modelling of a Defined-Benefit Social Security Pension Scheme: An Analytical Approach. (2008) *Annals of Actuarial Science*. 3(1-2), 127-185. <https://doi.org/10.1017/S174849950000049X>
5. McCrea R., King R., Graham L., Börger L. (2023). Realising the promise of large data and complex models. *Methods in Ecology and Evolution*. Vol.14, Issue 1, 4-11. doi: 10.1111/2041-210X.14050
6. Frees E. W. (2010). *Regression Modeling with Actuarial and Financial Applications*. New York: Cambridge University Press.
7. Gupta R. Y., Mudigonda S. S., Baruah P. K., Kandala P. K. (2020). Implementation of Correlation and Regression Models for Health Insurance Fraud in Covid-19 Environment using Actuarial and Data Science Techniques. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. Vol. 9, Issue 3. 699-706. doi: 10.35940/ijrte.C4686.099320
8. Караєва Н. В. (2018). Методологічні аспекти та програмні засоби оцінки ризику здоров'я населення при несприятливому впливі факторів навколишнього середовища. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Вип. 1(47), 164-169. doi: 10.26906/SUNZ.2018.1.164
9. Естілл Я. Вплив на здоров'я та соціальні витрати, пов'язані із забрудненням повітря у великих містах України. United Nations Development Programme. Звіт. Retrieved from: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-03/Health%20impacts%20and%20social%20costs%20associated%20with%20air%20pollution%20in%20larger%20urban%20areas%20of%20Ukraine%20%28UA%29.pdf>
10. Проект «Всесвітній індекс якості повітря». Retrieved from: <https://aqicn.org> та <https://waqi.info>.
11. González Parra, G., Arenas, A. J. (2014). A mathematical model for social security systems with dynamical systems. *Ingeniería Y Ciencia*, 10(19), 33–53. doi: 10.17230/ingciencia.10.19.2
12. Iyer S. (1999). *Actuarial mathematics of social security pensions*. International Labour Organization. Retrieved from: [https://www.issa.int/sites/default/files/documents/publications/2Actuarial\\_mathematics\\_of\\_ss\\_pensions\\_en-29172.pdf](https://www.issa.int/sites/default/files/documents/publications/2Actuarial_mathematics_of_ss_pensions_en-29172.pdf)
13. Lähderanta T., Salonen J., Möttönen J., Sillanpää M.J. (2022). Modelling old-age retirement: An adaptive multi-outcome LAD-lasso regression approach. *International Social Security Review*: Vol. 75, Issue 1. 3-29. doi: 10.1111/issr.12287
14. Black E., Lattyak C. G., Chairperson V., Stone L. K. (2023). *Senior Pension Fellow Modeling – for Pension Actuaries*. Washington: The American Academy of Actuaries. Retrieved from: [https://www.actuary.org/sites/default/files/2023-01/Modeling\\_Practice\\_Note.pdf](https://www.actuary.org/sites/default/files/2023-01/Modeling_Practice_Note.pdf)
15. Global Burden of Disease. Retrieved from: <https://www.healthdata.org/research-analysis/gbd>
16. Постанова Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2004 р. № 1677 «Методика проведення актуарних розрахунків у системі загальнообов'язкового державного пенсійного страхування». Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/npas/10301286>
17. Trofymchuk, O., Bidiuk, P., Terentiev, O., Prosyankina-Zharova, T. (2019). *Decision Support Systems for Modelling, Forecasting and Risk Estimation*. Riga: LAP Lambert Academic Publishing.
18. Shapovalenko, N. (2021). A Suite of Models for CPI Forecasting. *Visnyk of the National Bank of Ukraine*, 252, 4-36. doi: 10.26531/vnbu2021.252.01
19. Бідюк П. І., Романенко В. Д., Тимошук О. Л. (2013). *Аналіз часових рядів*. Київ: НТУУ КІП.
20. Seber G. A. F., Wild C. J. (1989). *Nonlinear Regression*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
21. Hurvich C. M., Simonoff J. S., Tsai C. L. (1998). Smoothing parameter selection in nonparametric regression using an improved Akaike information criterion. *Journal of the Royal Statistical Society*. Vol. 60, Issue 2, 271–293.
22. Fahrmeir L., Kneib T., Lang S., Marx B. D. (2021). *Regression Models, Methods and Applications*. Berlin: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-662-63882-8

23. Abubakari A. G. (2022). Actuarial Measures, Regression, and Applications of Exponentiated Fréchet Loss Distribution. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*. Vol. 2022 1-17. <https://doi.org/10.1155/2022/3155188>
24. Thrane C. (2020). *Applied Regression Analysis Doing, Interpreting and Reporting*. New York: Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.4324/9780429443756>
25. Григорків М.В. (2020). *Динамічні моделі еколого-економічних систем в умовах соціально-економічної кластеризації: монографія*. Тернопіль: «Економічна думка ТНЕУ».
26. Pearl, J. (2000). *Causality: models, reasoning, and inference*. Cambridge University Press.
27. Jensen, F.V. (2001). *Bayesian networks and decision graphs*. New York: Springer. doi:10.1007/978-1-4757-3502-4
28. Spiegelhalter, D., Dawid, P., Lauritzen, S., Cowell, R. (1993). Bayesian analysis in expert systems. *Statistical Science*, 8 (3), 219–247.
29. Lauritzen, S. L., Spiegelhalter, D.J. (1988). Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. *Journal Royal Statistics Society, series B (Methodology)*. 50 (2), 157-194.
30. Spirtes, P., Glymour, C., Scheines, R. (1993). *Causation, Prediction and Search. Part of the book series: Lecture Notes in Statistics (LNS, vol. 81)*. Berlin: Springer Verlag. doi:10.1007/978-1-4612-2748-9
31. Spirtes, P., Glymour C., Scheines, R. (1991). From probability to causality. *Philosophical Studies*, 64, 1–36. doi:10.1007/BF00356088
32. Згуровський, М.З., Бідюк, П.І., Терентьев, О.М., Просянкін-Жарова Т.І. (2015). *Байєсівські мережі у системах підтримки прийняття рішень*. Київ: ТОВ «Видавниче Підприємство «Едельвейс».
33. Державна служба статистики України. Навколишнє природне середовище. Retrieved from: <https://www.ukrstat.gov.ua>
34. Щоденні та щомісячні спостереження за забрудненням атмосферного повітря. Retrieved from: <https://diia.data.gov.ua/>
35. Чугаєвська С.В., Ковтун Н.В. (2022). *Основи статистичного моделювання: навч. посібник*. Житомир: Видавництво ПП "Рута".
36. Genie 2.0. Retrieved from <https://www.bayesfusion.com/genie/>

Стаття надійшла до редакції 17.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 23.08.2024

## REFERENCES

1. Dubinina, S.V., & Bidiuk, P.I. (2017). Zastosuvannya metodiv intelektualnogo analizu danyh intelektualnogo analizu do rozv'azannya zadach aktuarnogo modeluvannya ta otzinuvannya finansovyh ryzykiv. *Systemny doslidgenya ta informatsiyni tehnologii*, 1, 49–64. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2017.1.04> [in Ukrainian].
2. Czernicki, D. How cloud computing transforms actuarial modeling infrastructure. Retrieved from: [https://www.ey.com/en\\_us/insights/insurance/cloud-computing-implications-for-actuarial-modeling](https://www.ey.com/en_us/insights/insurance/cloud-computing-implications-for-actuarial-modeling)
3. Larochelle, J.-P., Carlson, P., Cote, V. C., Lu, Y., Shapiro, N., Tam, A., Thusu, V., & Zhang, A. (2023). *Predictive Analytics and Machine Learning. Practical Applications for Actuarial Modeling (Nested Stochastic)*. Schaumburg: Society of Actuaries. Research Institute. Retrieved from <https://www.soa.org/49ae74/globalassets/assets/files/resources/research-report/2023/predictive-analytics-and-machine-learning.pdf>
4. Iyer, S. (2008). Stochastic Actuarial Modelling of a Defined-Benefit Social Security Pension Scheme: An Analytical Approach. *Annals of Actuarial Science*, 3(1-2), 127-185. <https://doi.org/10.1017/S174849950000049X>

5. McCrea, R., King, R., Graham, L., & Börger, L. (2023). Realising the promise of large data and complex models. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(1), 4-11. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14050>
6. Frees, E.W. (2010). *Regression Modeling with Actuarial and Financial Applications*. New York: Cambridge University Press.
7. Gupta, R.Y., Mudigonda, S.S., Baruah, P.K., & Kandala, P.K. (2020). Implementation of Correlation and Regression Models for Health Insurance Fraud in Covid-19 Environment using Actuarial and Data Science Techniques. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 9(3), 699-706. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C4686.099320>
8. Karaeva, N.V. (2018). Metodologichny aspekty ta programni zasoby orzinky riziku zdorov' u naselennya pry nespriyatlyvomu vplyvy daktoriv navkolyshnyogo seredovysa. *Systemy upravlinnya, navigatzii ta zv'yazku*, 1(47), 164-169. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.1.164> [in Ukrainian].
9. Estill, Ya. Vplyv na zdorov'ya ta sotzialny vytraty, pov'yazany iz zabrudnennyam povitrya u velykyh mistah Ukrainy. United Nations Development Programme. Report. Retrieved from: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-03/Health%20impacts%20and%20social%20costs%20associated%20with%20air%20pollution%20in%20larger%20urban%20areas%20of%20Ukraine%20%28UA%29.pdf> [in Ukrainian].
10. Proekt «Vsesvitniy index yakosti povitrya». Retrieved from: <https://aqicn.org> and <https://waqi.info> [in Ukrainian].
11. González Parra, G., & Arenas, A.J. (2014). A mathematical model for social security systems with dynamical systems. *Ingeniería Y Ciencia*, 10(19), 33–53. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.10.19.2>
12. Iyer, S. (1999). *Actuarial mathematics of social security pensions*. International Labour Organization. Retrieved from: [https://www.issa.int/sites/default/files/documents/publications/2Actuarial\\_mathematics\\_of\\_ss\\_pensions\\_en-29172.pdf](https://www.issa.int/sites/default/files/documents/publications/2Actuarial_mathematics_of_ss_pensions_en-29172.pdf)
13. Lähderanta, T., Salonen, J., Möttönen, J., & Sillanpää, M.J. (2022). Modelling old-age retirement: An adaptive multi-outcome LAD-lasso regression approach. *International Social Security Review*, 75(1), 3-29. <https://doi.org/10.1111/issr.12287>
14. Black, E., Lattyak, C.G., Chairperson, V., & Stone, L.K. (2023). *Senior Pension Fellow Modeling – for Pension Actuaries*. Washington: The American Academy of Actuaries. Retrieved from: [https://www.actuary.org/sites/default/files/2023-01/Modeling\\_Practice\\_Note.pdf](https://www.actuary.org/sites/default/files/2023-01/Modeling_Practice_Note.pdf)
15. Global Burden of Disease. Retrieved from: <https://www.healthdata.org/research-analysis/gbd>
16. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 16 grudnya 2004 r. № 1677 «Metodyka provedennya aktuarnykh rozrahunkiv u systemi zagaknoobov'yazkovogo derzavnogo pebsiynogo strahuvanya». Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/npas/10301286>
17. Trofymchuk, O., Bidiuk, P., Terentiev, O., & Prosyankina-Zharova, T. (2019). *Decision Support Systems for Modelling, Forecasting and Risk Estimation*. Riga: LAP Lambert Academic Publishing.
18. Shapovalenko, N. (2021). A Suite of Models for CPI Forecasting. *Visnyk of the National Bank of Ukraine*, 252, 4-36. <https://doi.org/10.26531/vnbu2021.252.01>
19. Bidiuk, P.I., Romanenko, V.D., & Tymoshuk, O.L. (2013). *Analyz chasovykh ryadiv*. Kyiv: NTUU KPI [in Ukrainian].
20. Seber, G.A.F., & Wild, C.J. (1989). *Nonlinear Regression*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
21. Hurvich, C.M., Simonoff, J.S., & Tsai, C.L. (1998). Smoothing parameter selection in nonparametric regression using an improved Akaike information criterion. *Journal of the Royal Statistical Society*, 60(2), 271–293.
22. Fahrmeir, L., Kneib, T., Lang, S., & Marx, B.D. (2021). *Regression Models, Methods and Applications*. Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63882-8>



23. Abubakari, A.G. (2022). Actuarial Measures, Regression, and Applications of Exponentiated Fréchet Loss Distribution. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 2022, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2022/3155188>
24. Thrane, C. (2020). *Applied Regression Analysis Doing, Interpreting and Reporting*. New York: Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.4324/9780429443756>
25. Grygorkiv, M.V. (2020). *Dynamichny modely ekologo-ekonomichnyh system v umovah sotzialno-ekonomichnoi klasteryzatzii: monographia*. Ternopil: «Ekonomichna dumka. TNEU» [in Ukrainian].
26. Pearl, J. (2000). *Causality: models, reasoning, and inference*. Cambridge University Press.
27. Jensen, F.V. (2001). *Bayesian networks and decision graphs*. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3502-4>
28. Spiegelhalter, D., Dawid, P., Lauritzen, S., & Cowell, R. (1993). Bayesian analysis in expert systems. *Statistical Science*, 8 (3), 219–247.
29. Lauritzen, S. L., & Spiegelhalter, D.J. (1988). Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. *Journal Royal Statistics Society, series B (Methodology)*, 50 (2), 157-194.
30. Spirtes, P., Glymour, C., & Scheines, R. (1993). *Causation, Prediction and Search. Part of the book series: Lecture Notes in Statistics (LNS, vol. 81)*. Berlin: Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2748-9>
31. Spirtes, P., Glymour, C., & Scheines, R. (1991). From probability to causality. *Philosophical Studies*, 64, 1–36. <https://doi.org/10.1007/BF00356088>
32. Zgurovs'kyj, M.Z., Bidjuk, P.I., Terent'jev, O.M., & Prosjankina-Zharova, T.I. (2015). *Bajjesivs'ki merezhi u systemah pidtrynky pryjnjattja rishen'*. Kyi'v: TOV «Vydavnyche Pidpryjemstvo «Edel'vejs»» [in Ukrainian].
33. Derzavna sluzba statystyky Ukrainy. Navkolyshnye pryrodne seredovyshe. Retrieved from: <https://www.ukrstat.gov.ua> [in Ukrainian].
34. Shodenny ta shomisyachni sposteregenya za zabrudnennyam atmosfernogo povitrya. Retrieved from: <https://diiia.data.gov.ua/> [in Ukrainian].
35. Chugaevska, S.V., & Kovtun, N.V. (2022). *Osnovy statystychnogo modeluvannya: navch. posibnyk*. Gytomyr: Vydavnytstvo PP "Ruta" [in Ukrainian].
36. Genie 2.0. Retrieved from <https://www.bayesfusion.com/genie/>

*The article was received 17.05.2024 and was accepted after revision 23.08.2024*

**Зарудний Олексій Борисович**

здобувач, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-7462-3899> **e-mail:** oleksii.zarudnyi@gmail.com

UDC 004.09, 550.8

**Mykyta Myrontsov**, Ds, Leading researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2830-8803> *e-mail*: [myrontsov@ukr.net](mailto:myrontsov@ukr.net)

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

## **AN EXAMPLE OF THE APPLICATION OF NEURAL NETWORKS OF A SIMPLE ARCHITECTURE TO UNFOCUSED WELL ELECTROMETRY PROBES**

***Abstract.** An effective method of finding stable solutions of inverse problems of electric and induction logging along the well is proposed, which allows avoiding the influence of the resistance values of the neighboring formations on the determination of the geoelectrical parameters of the object under study. A highly efficient method was proposed for solving such an unstable inverse problem. This method is based on the application of a neural network with inverse error propagation of a simple architecture. Namely three-layer. The mathematical statement of the problem is given, both the topology of the neural network and all its parameters are described in detail. In the course of the numerical experiment, they were selected as optimal. The process of building a base for training a neural network is described in detail. Namely, how each of the examples of the learning base is built by solving a direct problem. With this cut parameter, the training for each example is chosen arbitrarily, which guarantees a comprehensive range for training the neural network. The number of examples in the training base is one hundred thousand examples. As the activation function, the sigmoid is chosen due to the fact that it is differentiable everywhere. The results of testing the written program are given. The learning rate was estimated to obtain the required small error. It is shown that this approach is stably convergent. For testing, the parameters of the layers of the cut, which are inherent to the geophysical parameters of the cuts of the Dnipro-Donetsk depression, were chosen. A complex of lateral logging sounding was chosen as the electrical logging equipment. Four-probe low-frequency induction logging equipment was chosen as induction logging equipment. Examples for induction and electrical logging are given separately. The obtained results are analyzed in detail. Ways of further improvement of the obtained neural network and its use for other problems of geophysics are given.*

***Keywords:** geophysical exploration of wells, resistivity, oil and gas wells, Shoulder effect, inverse problem, vertical resolution.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.3.177-182>

**1. Introduction.** The solution of most mathematical inverse problems faces the problem of stability. Inverse problems of electrometry are no exception [1]. Consider the problem of establishing the electrical specific resistivity (SR) of a layer of finite thickness (in the presence of axial symmetry of the problem), which is part of the layering opened by a vertical well. Fig. 1-4 shows a comparison of the SP and the measured apparent resistivity (AR) inherent in the conditions of the Dnipro-Donetsk basin [2]. It is clear that the measurement of the AR,  $\tilde{\rho}(z)$  at a single point with the  $z$  coordinate (the depth along the axis of the well in the cylindrical coordinate system) will be affected by the SR values in some vicinity of the measurement point proportional to the length of the probe.

It should be noted that the use of NN in the tasks of geophysics and in particular the geophysical investigation of wells is not new [3, 4]. However, the author is not aware of the use of such an approach for unfocused probes. A two-layer NN will be used in the work. Well-known works are devoted to the use of NN of complex architecture (deep learning) to solve the problem of modeling (prediction) of logging data (solving a direct problem).

**The aim of the work** is to create a method that eliminates the influence of neighboring layers (shoulder effect) on the determination of geoelectrical parameters of the studied object by using neural networks (NN) of simple architecture.

**2. Shoulder effect.** For the task of low-frequency induction logging (IL), the electric specific conductivity (SC)  $\sigma$  and the apparent conductivity (AC)  $\tilde{\sigma}$  (inverse of the SR and AR values) are related by the equation:

$$\tilde{\sigma}(z) = \int g(z - z')\sigma(z')dz', \quad (1)$$

where  $g$  is the so-called geometric factor of the probe [5]. The problem of solving such a Fredholm equation of the first kind of the convolution type is incorrectly posed according to Hadamard and, accordingly, is unstable [1].

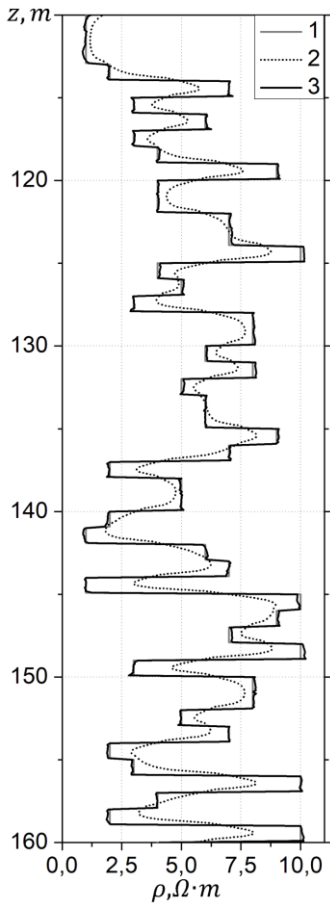


Fig. 1. Probe IL1.25. Code of the curves: 1 – given SR, 2 – measured AR, 3 – recovered SR

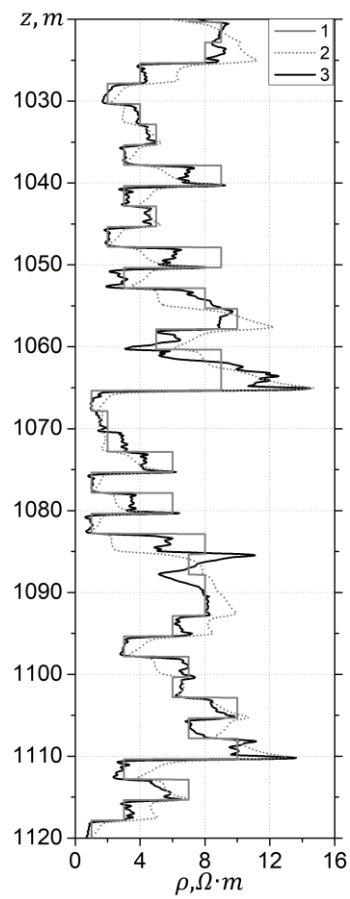


Fig. 2. Probe EL A2.0M0.5N. Code of the curves: 1 – given SR, 2 – measured AR, 3 – recovered SR

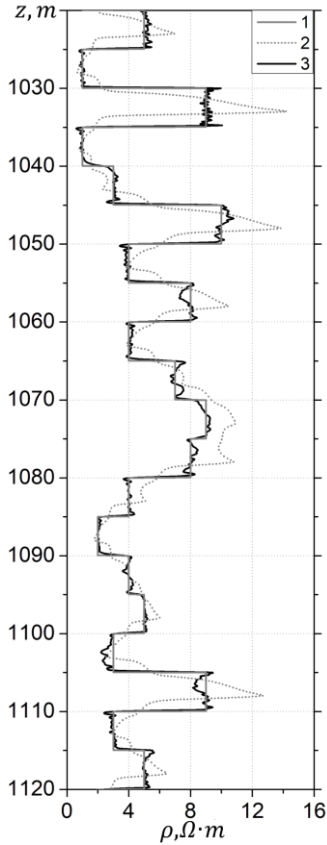


Fig. 3. Probe EL A2.0M0.5N. Code of the curves: 1 – given SR, 2 – measured AR, 3 – recovered SR

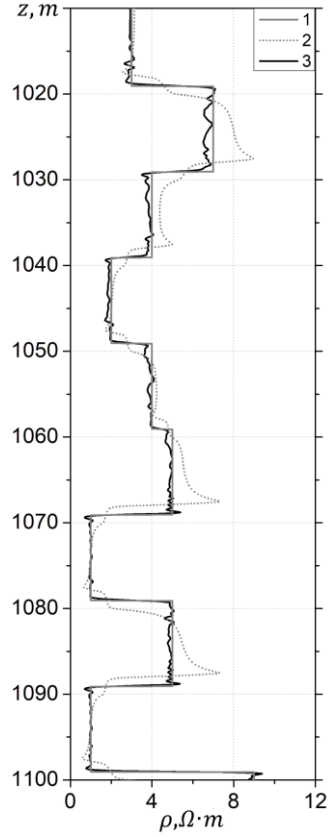


Fig. 4. Probe EL A2.0M0.5N. Code of the curves: 1 – given SR, 2 – measured AR, 3 – recovered SR

The sought values of SC are determined through the measured values of AC, which in turn depend on the values of AC at some interval (determined by the form of function  $g$ ). Therefore, the determination of the AC value at some point is influenced by the measurement values at the neighboring ones. This phenomenon is called "Shoulder effect". The problem of electrical logging (EL) is generally nonlinear and does not have an integral description of the type of the given equation (1), but the Shoulder effect is also present in it.

**3. Formulation of the problem.** A method of finding a stable solution to the problem of determining the SR based on the data of the measurement of the AR for IL and EL will be proposed. In both cases, we will look for the value of SR itself (since SR and AR are related as  $\sigma = \rho^{-1}$ ). For both problems (EL and IL), we need to solve the problem of finding  $\rho_i$  at each point  $z_i$  of some interval if we know:

$$\tilde{\rho}_{z_i}(\rho_{z_{i-m}}, \dots, \rho_{z_i}, \dots, \rho_{z_{i+m}}), \quad (2)$$

where the coordinate indices are simply the numbers of an ordered set of measurement points (the measurement along the well is not continuous and is performed with a discrete step  $\Delta z$ ). That is, we use an approximation model where the SR is a piecewise continuous function along the well and within each interval of thickness  $\Delta z$ , the SR values do not change.

**4. Architecture and education of NN.** In fact, (2) means that the direct problem is the search for the mapping of SR values into one AR value. However, we need to set another mapping (inverted):

$$\tilde{\rho}_{z_{i-m}}, \dots, \tilde{\rho}_{z_i}, \dots, \tilde{\rho}_{z_{i+m}} \rightarrow \rho_{z_i}. \quad (3)$$

We will use this type of connection for learning NN with backpropagation of the error [6]. We have [1, 7] a reliable tool for calculating mapping (3). That is, according to known values of AR at some interval  $(2m + 1) \cdot \Delta z$  we need to determine the AR in its center.

For each example, we will model the AR curves for the interval of the well cut which consists of a sequence of layers the SR of which we set as a constant (within each layer) but random value for each of them (if the SR of neighboring layers defined in this way coincide, then we in fact, we have one layer of permanent SR but twice as thick).

Therefore, the SR value of each of the well cut of the selected interval will change randomly for each NN training example within the range of SR values of the field in which the geophysical wells are surveyed (see fig. 3, 4, curve 1).

Thus, we have for each training example of our NN an "interval-measurement point" correspondence. The construction of NN training examples in this way was significantly simplified by using our own software for modeling EL and IL.

We will use the sigmoid  $e^x / (e^x + 1)$  whose values are limited to the interval (0,1) as the activation function of all neurons of our NN. The choice of sigmoid is due to the need for continuous differentiability of the activation function for using the method of backpropagation of the error. Accordingly, taking into account the limited range of possible sigmoid values before the learning process, we normalize the input data (AR values) and output data (SR values) for each example.

The following NN parameters were chosen: two-layer, the activation function is sigmoid, the learning step is 0.5, the number of epochs is fixed and equal to 20,000, the number of training examples was 100,000 (both for IL and EL problems). The number of neurons in each layer was chosen separately for IR and EC problems.

**5. NN check, results.** It should be emphasized that the examples are given for unfocused probes. This just demonstrates the possibilities of using NN for more complex tasks. Indeed, joining the complex of geophysical logging focused down probes of electric logging or induction significantly improve the vertical resolution of the method as a whole. This stage of the research did not include the assessment of the possibilities of using NN for solving inverse solutions of focused problems. To solve such problems, where both unfocused and focused probes are used at the same time, it was solved at one time, but under the condition that the layers adjacent to the studied layer have the same resistance and are of semi-unsheared thickness. War conditions do not allow references to authors from the aggressor country.

As it is generally accepted to check the quality of training of NN, we set the input data to examples that were not used during training and compare what the NN gives at the output and what it should have given.

Consider the IL problem. According to the value of the length of the interval (12.1 m) on which the data for the examples of NM training were calculated and the size of the recording step (0.1 m), the number of NN input data is 121, the number of neurons in the first hidden layer is 20, the number of neurons in the second hidden layer (corresponds to the number of output signals) – 1. That is, synapses connect: the

input data layer and the first hidden layer and the first and second hidden layers. The value at the output of the second hidden layer is the value of the NN output signal.

In fig. 1 shows the results for the I1.25 probe [5] (where the number means the distance between the generating and receiving coils and thus it determines the vertical resolution of the method). It turned out that for layers with a thickness of 1 meter (less than the length of the probe), the SR according to the proposed method is set almost perfectly from the point of view of the generally accepted requirements of well-logging (determining the boundaries of each layer, determining the value of its SR with an error of no more than 10%). For the EL problem (recording step 0.05 m), the length of the interval on which the data for the NN training examples was calculated was 10.05 m. Therefore, the number of input signals is 201. The number of neurons of the first hidden layer was chosen to be 30, and the number of neurons of the second was 1.

In fig. 2-4 show the results (Fig. 2 for stratification of layers 2.5 m thick; Fig. 3 – 5 m thick; Fig. 4 – 10 m thick) for the known A2M0.5N probe (the first digit is the distance between the current electrode and the first measuring electrode, the second digit is the distance between the measuring electrodes) [7], which is included in the complex of standard electrometry of wells used in Ukraine [2].

For the layer thickness of 2.5 m, the boundaries of each of them are determined precisely, but it was not possible to determine the SR even qualitatively. For layer thicknesses of 5 m and 10 m, the SR is installed almost perfectly according to the proposed method.

**6. Discussion.** The results obtained in a similar way for three-layer NN do not differ significantly from those obtained for two-layer NN except for an increase in training time.

Thus, knowing the vertical profile of the SR for each probe of the multi-probe complex, we can also determine its radial SR distribution with an accuracy that corresponds to the accuracy of the proposed method. Since the use of NN is essentially a method of approximation, we, having a very diverse base of learning using random, have created a reliable method of approximation. Since we did not have examples of unstable solutions in the basis (the solution of the direct problem), then such a solution (already the inverse problem) turned out to be stable.

The greater accuracy of setting the vertical profile for IL tasks than for EL problems is a consequence of a more accurate qualitative coincidence of the measurement curves AR with the SR curves, which must be restored. But the achieved accuracy of establishing the SR of layers comparable to two lengths of the probes is more than high.

The choice of examples selected for learning NN is definitely decisive.

**7. Conclusions.** The possibilities of using NN to solve the problems of increasing the vertical spatial ability of unfocused probes are demonstrated. It is shown what vertical resolution can be achieved for such probes using only two-layer neural networks.

## REFERENCES

1. Myrontsov, M.L. (2019). Electrometry of oil and gas wells. Kyiv: "EUSTON" LLC [in Ukrainian].
2. Yehurnova, M.G., Zaykovsky, M.Ya., Zavorotko, Y.M., Tsyokha, O.G., Knishman, O.Sh., Mulyar, P.M., Demyanenko, I.I. (2005). Oil and gas prospects of Ukraine. Oil and gas potential and features of lithogeophysical structure of Lower Carboniferous and Devonian deposits of the Dnieper-Donets depression. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].

3. Jun Wang, Junxing Cao, Jiachun You, Ming Cheng<sup>1</sup> and Peng Zhou. (2021). A method for well log data generation based on a spatio-temporal neural network. *Journal of Geophysics and Engineering*, 18, 700–711. <https://doi.org/10.1093/jge/gxab046>
4. Lei Wu, Zhenzhen Dong, Weirong Li, Cheng Jing and Bochao Qu. (2021). Well-Logging Prediction Based on Hybrid Neural Network Model. *Energies*, 14. <https://doi.org/10.3390/en14248583>
5. Anderson, B.I. (2001). Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. Delft: DUP Science.
6. Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J. (1986). Learning Internal Representations by Error Propagation. *Parallel Distributed Processing*, 1, 318–362.
7. Myrontsov, M.L., Dovgyi, S.O., Trofymchuk, O.M., Lebid, O.G., Okhariev, V.O. (2022). Development and testing of tools for modeling R&D works in geophysical instrument-making for oil and gas well electrometry. *Science and Innovation*, 18(3), 28–36. <https://doi.org/10.15407/scine18.03.028>

*The article was received 05.07.2024 and was accepted after revision 06.09.2024*

**М.Л. Миронцов**

### **ПРИКЛАД ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРОСТОЇ АРХІТЕКТУРИ ДЛЯ НЕ СФОКУСОВАНИХ ЗОНДІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КАРОТАЖУ**

**Анотація.** Запропоновано ефективний метод знаходження стійких розв'язків обернених задач електричного та індукційного каротажу вздовж свердловини, який дозволяє уникнути впливу значень опору сусідніх пластів на визначення геоелектричних параметрів досліджуваного об'єкта. Для розв'язання такої нестійкої оберненої задачі було запропоновано високоефективний метод. Такий метод заснований на застосуванні нейронної мережі з оберненим розповсюдженням похибки простої архітектури. А саме тришарової. Дано математичну постановку задачі, детально описано як топологію нейронної мережі, так і всі її параметри. В ході числового експерименту вони обрані оптимальними. Детально описано процес побудови бази для навчання нейронної мережі. А саме як за допомогою розв'язання прямої задачі будується кожен з прикладів бази навчання. При цьому параметри розрізу для кожного прикладу навчання обираються довільним чином, що гарантує всеохоплюючий діапазон для навчання нейронної мережі. Кількість прикладів в базі навчання складає сто тисяч прикладів. В якості функції активації обрано сигмоїду через те, що вона всюди диференційована. Наведено результати тестування написаної програми. Оцінена швидкість навчання для отримання необхідної малої похибки. Показано, що такий підхід є стабільно збіжним. Для тестування обрано параметри пластів розрізу, що притаманні геофізичним параметрам розрізів Дніпровсько-Донецької западини. В якості апаратури електричного каротажу обрано комплекс бокового каротажного зондування. В якості апаратури індукційного каротажу обрано чотиризондову апаратуру низькочастотного індукційного каротажу. Наведено окремо приклади для індукційного та електричного каротажу. Детально проаналізовано отримані результати. Наведено шляхи подальшого вдосконалення отриманої нейронної мережі та використання її для інших задач геофізики.

**Ключові слова:** геофізичне дослідження свердловин, питомий опір, нафтогазові свердловини, обернена задача, вертикальна роздільна здатність.

*Стаття надійшла до редакції 05.07.2024 і прийнята до друку після рецензування 06.09.2024*

**Миронцов Микита Леонідович**

доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-2830-8803> **e-mail:** myrontsov@ukr.net

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copying © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. All rights reserved.

## ДО УВАГИ АВТОРІВ ЗБІРНИКА

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню збірника.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова (не менше п'яти) двома мовами (українською та англійською).

Підготовка статті здійснюється в текстовому редакторі MS WORD for WINDOWS, з використанням шрифту Times New Roman, Суг, кегль 11, одинарний інтервал, полями 2,0 см з кожного боку, заданим розміром сторінок 17x26 см.

Усі формули мають бути набрані в редакторі MathType.

Ілюстрації повинні обов'язково нумеруватися, мати книжкову орієнтацію і не можуть перевищувати за розміром задану сторінку (параметри сторінки 17x26 см з полями 2,0 см). Перелік літературних джерел перекладається англійською мовою (або транслітерується в романському алфавіті) і подається відповідно до міжнародного стандарту оформлення наукових публікацій **APA (American Psychological Association) style** загальним списком у кінці статті за чергою посилань у тексті.

Наприкінці статті наводиться коротка довідка про авторів, де вказуються прізвище, повне ім'я та по батькові авторів, науковий ступінь, вчене звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, особисті дані кожного з авторів (адреса, місто, країна, контактний телефон, e-mail), ORCID ID.

Обов'язково слід надати електронну версію статті в редакторі Microsoft Word.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами збірника, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ збірника, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником. Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія збірника.

Електронна версія збірника, правила оформлення та вимоги до статей містяться в Інтернеті на сайті <http://www.es-journal.in.ua>, який систематично оновлюється.

Збірник наукових праць також представлений на сайті Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України <http://itgip.org/> у розділі «Видавнича діяльність» та на сайті бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури <http://library.knuba.edu.ua/node/883>.



*Редактор – В.П. Берчун*

---

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»  
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36а.  
Тел.: (044) 360-22-66  
[www.yuston.com.ua](http://www.yuston.com.ua)

**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру  
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції  
серія дк № 497 від 09.09.2015 р.**

---

Підписано і здано до друку 30.09.24 Формат 70x108/16. Папір офсетний.  
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 16.1  
Обл.-вид. арк. 12.47  
Замовлення № \_\_\_\_\_

Тираж 300 примірників

---

КИЇВ 2024