

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет
будівництва і архітектури

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут телекомунікацій
і глобального інформаційного простору

Екологічна безпека та природокористування

Environmental safety and natural resources

Збірник наукових праць

ВИПУСК 50

2024

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 2 (50), квітень – червень 2024 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 2 (50), April – June 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 № 7 від 20.06.2024)

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

Кривомаз Т.І., Ільченко І.С., Циба А.М., Гамоцький Р.О., Гетьман Є.А. Дослідження етапів розвитку інклюзивності побудованого середовища в Україні	6
Кравченко М.В., Ткаченко Т.М. Розробка методів кількісної оцінки ефективності конструкції дощового саду у контексті управління дощовими водами.....	19
Святогоров І.О. Застосування геотехнічних конструкцій в «зеленому будівництві».....	36
Ковальська О.І. Водна небезпека міста Миколаєва за умов воєнного часу.....	48
Сатін І.В., Романова Т.І., Панченко О.С. Удосконалення технологій механіко-біологічного оброблення за морфологічним та фракційним складом побутових відходів.....	64

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Азізов Т.Н., Люльченко В.Г., Орлова О.М. Швидкоспоруджувана захисна споруда цивільного захисту.....	78
Левченко О.Г., Полукаров Ю.О., Безушко О.М., Гончарова О.М., Землянська О.В. Гігієнічна оцінка магнітних полів при різних способах дугового зварювання.....	88

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Трофимчук О.М., Гордієнко О.В., Анпілова Є.С., Яковлев Є.О. Моніторинг вертикальних зсувів у Солотвинській агломерації за допомогою супутникових знімків Sentinel-1.....	102
Охарєв В.О., Підсадний С.Г. Інформаційна підтримка рішень в сфері техногенно-екологічної безпеки територій на основі технологій обробки геопросторових даних.....	115
Триснюк Т.В., Мосійчук Д.І. Інформаційні системи спостереження морських акваторій та прилеглих зон з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів.....	130
Горошкова Л.А., Бакурова А.В., Сумець О.М., Триснюк В.М., Шумейко В.О. Математичне моделювання транспортно-логістичної інфраструктури для повоєнного відновлення України.....	142
Курбет П.М., Руденок О.А. Метод параметричної адаптації перевірочних поліномів компонентного рекурсивного систематичного згорточного коду турбо коду.....	157
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	173

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Kryvomaz T., Ilchenko I., Tsyba A., Hamotskyi R., Hetman Ye. Study of the development of built environment inclusiveness in Ukraine	6
Kravchenko M., Tkachenko T. Development of methods for quantifying the effectiveness of rain garden design in the context of rainwater management.....	19
Sviatohorov I. Application of geotechnical structures in «green construction».....	36
Kovalska O. Water danger in the city of Mykolaiv under wartime conditions.....	48
Satin I., Romanova T., Panchenko O. Improvement of mechanical and biological treatment technologies according to the morphological and fractional composition of household waste.....	64

CIVIL SAFETY

Azizov T., Lyulchenko V., Orlova O. A prefabricated civil defense structure	78
Levchenko O., Polukarov Y., Bezushko O., Goncharova O., Zemlyanska O. Hygienic assessment of magnetic fields in different methods of arc welding...	88

INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

Trofymchuk O., Hordiienko O., Anpilova Ye., Yakovliev Ye. Monitoring vertical landslides in the Solotvyno agglomeration using Sentinel-1 satellite imagery.....	102
Okhariyev V., Pidsadnii S. Information support of decision making for technogenic and environmental safety using geospatial data analysis.....	115
Trysnyuk T., Mosiichuk D. Information systems of observation of marine waters and adjacent areas using remotely piloted aircraft.....	130
Horoshkova L., Bakurova A., Sumets A., Trysnyuk V., Shumeiko V. Mathematical modeling of transport and logistics infrastructure for the post-war reconstruction of Ukraine.....	142
Kurbet P., Rudenok O. The method of parametric adaptation of the check polynomials of the component recursive systematic convolution code turbo code.....	157
INFORMATION FOR AUTHORS	173

Ювілейний – п'ятдесятый номер збірника видано!

Інститутом телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України та Київським національним університетом будівництва і архітектури МОН України у 2008 р. було засновано збірник наукових праць «Екологічна безпека та природокористування» – видання, в якому публікуються сучасні дослідження вітчизняних вчених і фахівців в галузях інформаційних технологій і математичного моделювання, екологічної безпеки, раціонального природокористування, екологічного управління та питань цивільної безпеки.

У відповідності до вимог Порядку формування переліку наукових фахових видань України (Наказ Міністерства освіти і науки України 15.01.2018 №32), збірник 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 спеціальностями: 101, 183, 263, 122. На даний час збірник підготовлено для акредитації за спеціальністю 113. В збірнику також систематично публікуються статті за спорідненими спеціальностями, оскільки інтеграція наукових досліджень з різних спеціальностей у вирішенні задач екологічної безпеки довкілля та раціонального природокористування відповідає умовам сьогодення та перебування країни в умовах війни.

Здобувши всеукраїнське й міжнародне визнання, збірник продовжував розвиватися, зокрема був створений його сучасний сайт на платформі OJS. З метою підвищення якості опублікованої наукової інформації та інтеграції збірника до світового наукового простору проведена кропітка робота щодо гармонізації вимог до наукового змісту та правил оформлення статей з провідними науковими журналами світу, з подальшою індексацією збірника у міжнародних наукометричних базах: Ulrichsweb (Ulrich's Periodicals Directory) (США), Research Bible (Японія), Google Scholar, Index Copernicus (Польща) та ін. Постійно здійснюється робота з доповнення та оновлення зазначених наукометричних баз поточними випусками збірника; забезпечується актуальне інформаційне наповнення, оновлення та підтримка у робочому стані сайту збірника.

На сьогодні, від початку заснування, у збірнику надруковано понад 600 статей. Географія авторів статей охоплює всі континенти: від Північної Америки до Океанії (Філіппін і Австралії). У складі редакційної колегії багато відомих закордонних та вітчизняних вчених. Всі вітчизняні члени редакційної колегії мають наукові ступені, що відповідають спеціальностям акредитації збірника.

Дякуємо всім науковцям та освітянам – авторам надрукованих у збірнику наукових праць – та сподіваємось на подальшу плідну співпрацю з популяризації їх досягнень в закордонному та вітчизняному науковому просторі.

Головний редактор, член-кор. НАНУ,
д.т.н., проф.

Олександр Трофимчук

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDC 711.4:504

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

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

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

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

Yelyzaveta Hetman, student
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-0960-0846> *e-mail*: liza.getman13@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

STUDY OF THE DEVELOPMENT OF BUILT ENVIRONMENT INCLUSIVENESS IN UKRAINE

***Abstract.** The development of accessibility in Ukraine is a justified necessity, as an inclusive and sustainable built environment provides a decent level of quality of life for people with disabilities and improves standards for all citizens. Not only millions of people with disabilities, but also elderly people, patients with temporary injuries, pregnant women and mothers with children in strollers, as well as other categories of citizens, the total number of which can reach half of the population of Ukraine, belong to the population groups with reduced mobility. All of them experience difficulties due to the improper organization of public space and the built environment during independent movement, communication or receiving any services. In addition, hundreds of thousands of Ukrainians were seriously injured during the war, and tens of thousands became disabled, and in the process of rehabilitating the survivors and rebuilding Ukraine, unprecedented challenges will have to be solved. When creating inclusive infrastructure, close cooperation with local communities is necessary, as depending on the region, the degree of infrastructure destruction and the number of people with limited mobility will differ. In a smart city, interactive accessible infrastructure creates an inclusive environment for people with disabilities, in which they can integrate into society, realizing their civic, cultural, political, social and economic rights and responsibilities. Accessibility extends to learning and working conditions, housing,*

public facilities, infrastructure and the urban environment. Inclusion involves the removal of barriers and the development of concrete solutions for the equal involvement of all citizens in various spheres of life. The Ministry of Community Development, Territories and Infrastructure is improving building regulations to meet barrier-free requirements, and all renovated facilities must meet accessibility regulations and standards by the end of 2024. The national strategy for creating a barrier-free space is calculated until 2030 and provides for the elimination of barriers in six main areas: physical, social, economic, educational, digital, and informational. Five key stages in the development of the concept of inclusivity in Ukraine are highlighted and it is indicated that under the conditions of successful implementation of the national strategy and adaptation of the best international experience of architectural inclusivity, Ukraine can become a good example of barrier-free environment for all.

Key words: inclusiveness, accessibility, built environment, reconstruction of Ukraine, safety.

Т.І. Кривомаз, І.С. Ільченко, А.М. Циба, Р.О. Гамоцький, Є.А. Гетьман

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕТАПІВ РОЗВИТКУ ІНКЛЮЗИВНОСТІ ПОБУДОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА В УКРАЇНІ

Анотація. Розвиток безбар'єрності в Україні є обґрунтованою необхідністю, оскільки інклюзивне і стійке побудоване середовище забезпечує гідний рівень якості життя для людей з інвалідністю і покращує стандарти для всіх громадян. До маломобільних груп населення належать не тільки мільйони людей з інвалідністю, але й люди похилого віку, пацієнти з тимчасовими травмами, вагітні жінки та матері з дітьми в колясках, а також інші категорії громадян, загальна кількість яких може досягати половини населення України. Всі вони відчують труднощі через неналежну організацію громадського простору та побудованого середовища при самостійному пересуванні, комунікації або одержанні будь-яких послуг. Крім того, за роки війни сотні тисяч українців отримали серйозні травми, а десятки тисяч стали інвалідами, тому в процесі реабілітації постраждалих та відбудови України доведеться вирішувати безпрецедентні виклики. При створенні інклюзивної інфраструктури слід тісно співпрацювати з місцевими громадами, оскільки в залежності від регіону відрізнятиметься ступінь руйнування інфраструктури та кількість людей з обмеженою мобільністю. У розумному місті інтерактивна доступна інфраструктура створює інклюзивне середовище для людей з інвалідністю, в якому вони можуть інтегруватися в суспільство, реалізуючи свої громадські, культурні, політичні, соціальні та економічні права і обов'язки. Доступність поширюється на умови навчання і праці, житло, громадські заклади, інфраструктуру та міське середовище. Інклюзія передбачає усунення бар'єрів та розробку конкретних рішень для рівноправного залучення всіх громадян у різноманітні сфери життя. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури удосконалює будівельні норми для відповідності вимогам безбар'єрності, а до кінця 2024 року всі відновлені об'єкти мають відповідати нормам і стандартам доступності. Національна стратегія зі створення безбар'єрного простору розрахована до 2030 року і передбачає усунення бар'єрів у шести основних напрямках: фізичний, суспільний, економічний,

освітній, цифровий, інформаційний. Виділено п'ять ключових етапів у розвитку концепції інклюзивності в Україні і зазначено, що за умов успішної реалізації національної стратегії та адаптації кращого міжнародного досвіду архітектурної інклюзивності, Україна може стати взірцем безбар'єрності побудованого середовища.

Ключові слова: *інклюзивність, безбар'єрність, побудоване середовище, відбудова України, безпека.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.6-18>

Вступ

Сьогодні розвиток безбар'єрності в Україні є обґрунтованою необхідністю, що насамперед обумовлено потребами військових з інвалідністю та всіх постраждалих внаслідок війни. Загалом до маломобільної групи належать не тільки мільйони людей з інвалідністю, але й люди похилого віку, пацієнти з тимчасовими обмеженнями рухливості, матері з дітьми в колясках та інші категорії громадян, загальна кількість яких може досягти половини населення України. За роки повномасштабної війни сотні тисяч українців отримали серйозні травми, а десятки тисяч стали інвалідами внаслідок ампутації кінцівок. В українському суспільстві зростає масове розуміння необхідності розвитку інклюзивного суспільства, що стимулює підвищення попиту на високі стандарти безбар'єрності.

Рівень якості життя людей з інвалідністю визначає успішність розвитку суспільства. Соціальна підтримка, доступ до освіти, забезпечення роботою, доступність медичних та інших послуг відіграють ключову роль у покращенні якості життя для цієї групи населення. Важливо забезпечити доступність інфраструктури та послуг, а також сприяти формуванню справедливого відношення суспільства до людей з інвалідністю. Підтримка передбачає не лише матеріальні ресурси, але і створення умов для самореалізації та активної участі цієї групи в усіх сферах життя соціуму. У справедливому інклюзивному суспільстві різноманіття стає додатковим ресурсом, що збагачує життя всіх громадян. Розвиток інклюзивного і стійкого побудованого середовища інтегрує проблеми людей з інвалідністю в соціальні, економічні та екологічні аспекти держави та бізнесу, покращує стандарти для всіх та забезпечує гідний рівень якості життя.

Постановка завдання

Метою цього дослідження є визначення пріоритетних напрямків розвитку безбар'єрності побудованого середовища на фоні повномасштабної війни в Україні. У відповідності із поставленою метою сформульовано наступні завдання:

- визначити етапи розвитку інклюзивності побудованого середовища в Україні;
- проаналізувати напрямки розвитку безбар'єрного простору для створення інклюзивної інфраструктури;
- окреслити специфіку формування доступності міського простору та будівель для людей з інвалідністю в Україні.

Результати досліджень

В ході розвитку концепції інклюзивності побудованого середовища в Україні можна виділити п'ять ключових етапів (рис. 1). Перші десятиріччя становлення української державності (1991-2010 рр.) інваліди залишались «невидимими», оскільки у повсякденному житті стикалися з нездоланими бар'єрами. Це не тільки фізичні, інституційні та економічні бар'єри, пов'язані з середовищем, законами та політикою, але й стереотипи сприйняття інвалідів та відношення суспільства до людей з інвалідністю. Бар'єри принижують гідність людей, позбавляють їх прав і перешкоджають громадянам брати активну участь у житті суспільства. Бар'єри різного ґатунку виключають широкі верстви населення із суспільного життя. До маломобільних груп населення відносять людей, які відчують труднощі при самостійному пересуванні, комунікації або одержанні будь-яких послуг. До цієї категорії належать: 1) люди з різними функціональними порушеннями зору, слуху, опорно-рухового апарату тощо; 2) люди, які отримали тимчасову травму або зараз хворіють; 3) діти до 7 років; 4) люди, які супроводжують маленьких дітей; 5) вагітні жінки; 6) люди похилого віку. Всі вони відчують складнощі через неналежну організацію громадського простору та побудованого середовища.



Рис. 1. Етапи та складові розвитку безбар'єрності в Україні

З розвитком демократичності українського суспільства зростає соціальний запит на задоволення потреб інвалідів, а у грудні 2011 р. Верховна Рада України винесла на розгляд законопроект «Про внесення змін до деяких законів України щодо прав інвалідів». Проте міська інфраструктура все ще не відповідає вимогам безбар'єрного середовища і всі позитивні зрушення у цьому напрямку відбувалися виключно за ініціативою проєктувальників, оскільки більшість ДБН застаріла та не відповідає потребам інвалідів.

З 2016 р. вже помітні тенденції до врахування міжнародного досвіду у законодавчих ініціативах та реалізованих планах розвитку побудованого середовища. Зараз Державна інспекція архітектури та містобудування України обов'язково перевіряє відповідність будівельних проєктів вимогам ДБН В.2.2-40:2018 «Будинки і споруди. Інклюзивність будівель і споруд» [4]. Питання безбар'єрності активно обговорюються в органах державної влади зі стейкхолдерами інклюзивності. Термін «інваліди» замінюють на вислів «люди з інвалідністю» або «люди з функціональними порушеннями». Інклюзія передбачає усунення бар'єрів та розробку конкретних рішень, які дозволять кожній людині рівноправно брати участь у суспільному житті. Один із

ключових принципів інклюзії полягає у збільшенні ступеня залучення громадян у всі різноманітні сфери життя. Доступність поширюється на умови навчання і праці, житло, громадські заклади, інфраструктуру та міське середовище. Доступність має бути не тільки архітектурною, а й інформаційною, оскільки необхідно враховувати потреби людей з вадами слуху, зору та іншими комунікативними та психофізичними обмеженнями.

Зараз вже проглядаються горизонти переходу на четверту сходинку розвитку безбар'єрності, досягнення якої заплановано в Україні на 2030 рік. На цьому етапі передбачається остаточна демаргіналізація теми інвалідів, а всі будівлі та інфраструктура мають бути безбар'єрними за замовчуванням. Повна інклюзивність та пропаганда рівності виводить з тіні людей з особливими потребами. Для забезпечення архітектурної безбар'єрності зважають на чотири ключові моменти:

1) визначають особливості побудованого середовища, які можуть створювати перешкоди для певних категорій людей;

2) враховують весь спектр функціональних порушень людей з інвалідністю;

3) ретельно аналізують всі рівні планування побудованого середовища – від загальної інфраструктури до найдрібніших деталей;

4) відстежують зворотний зв'язок від користувачів і проводять роботу над помилками.

П'ятим етапом формування безшовного побудованого середовища стане універсальний дизайн. Концепція універсального дизайну описує проєктування продуктів і архітектурного середовища таким чином, щоб вони були доступними для максимальної кількості людей, незалежно від їх віку, інвалідності, статусу чи інших факторів. Згідно зі Стокгольмською декларацією, дизайн для всіх – це дизайн для людської різноманітності, соціальної інтеграції та рівності [13]. Проєкт Європейської комісії «Дизайн для всіх» спрямовано на забезпечення доступності середовища, продуктів, послуг та інтерфейсів для людей різного віку та можливостей у різноманітних ситуаціях і за різних обставин. Це такий дизайн простору, будівель, предметів і послуг, яким можуть користуватись абсолютно всі без будь-якої особливої адаптації [9].

Розвиток інклюзивності. Тенденції розвитку безбар'єрності та нагальна необхідність вселяють надію, що повна інклюзивність та універсальний дизайн побудованого середовища можуть бути реалізовані в Україні. У 2021 р. за ініціативи Олени Зеленської було прийнято «Національну стратегію з безбар'єрності», розроблено «Довідник безбар'єрності» та «Альбом безбар'єрних рішень» [1, 5]. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури продовжує удосконалення будівельних норм для відповідності вимогам безбар'єрності, а до кінця 2024 року всі відновлені об'єкти мають відповідати нормам і стандартам доступності [4, 8]. Уряд вже затвердив розроблену Міністерством відновлення постанову, згідно з якою підрядники під час проєктування, будівництва і відновлення пошкоджених об'єктів зобов'язані дотримуватися норм забезпечення доступності для маломобільних груп населення. Агентство відновлення уклало Меморандум про співпрацю з експертами з безбар'єрності, а реалізація пріоритетного проєкту «Безбар'єрне відновлення» житла та соціальних об'єктів, зруйнованих через війну, передбачає такі заходи:

1) Запровадження системи контролю за додержанням державних будівельних норм і стандартів щодо створення умов доступності для осіб з інвалідністю та інших маломобільних груп населення;

2) Запровадження нових та удосконалення ряду чинних будівельних норм і стандартів у сфері створення безбар'єрного простору, зокрема таких, що стосуються інклюзивності закладів соціального захисту населення;

3) Навчання фахівців у сфері містобудування, архітектури і транспорту сучасним підходам до створення безбар'єрного простору;

4) Активізація роботи з громадами в частині створення безбар'єрного простору на місцях.

При створенні інклюзивної інфраструктури слід тісно співпрацювати з місцевими громадами, оскільки в залежності від регіону вирізнятиметься ступінь руйнування інфраструктури та кількість людей з обмеженою мобільністю. У бюджеті Києва на 2024 рік для створення безбар'єрного простору заплановано близько 1,5 млрд грн, оскільки доступність та інклюзивність задекларовано у якості пріоритетних напрямків розвитку столиці. Передбачені кошти підуть на забезпечення житлового фонду пандусами та іншими необхідними умовами, щоб зробити вулиці міста Київ більш доступними. Не залишаються осторонь і інші міста України, так, у Львові на площі Ринок облаштовано інклюзивний простір для безперешкодного переміщення маломобільних груп населення. Громадською організацією дослідження комфорту міського простору та якості життя «ЛУН Місто» створено єдину базу безбар'єрних локацій, чек-лист безбар'єрності житла та мапу безбар'єрності України [2].

Державна політика безбар'єрності передбачає формування такого підходу, за якого кожна людина може отримати вільний доступ до будь-якої сфери життя: навчання, будування кар'єри, безбар'єрного пересування країною тощо. У квітні 2021 року була прийнята Національна стратегія зі створення безбар'єрного простору, яка була розроблена в межах ініціативи першої леді Олени Зеленської «Без бар'єрів» та на виконання Указу Президента України. Стратегія розрахована до 2030 року і передбачає усунення бар'єрів у шести основних напрямках: фізичний, суспільний, економічний, освітній, цифровий, інформаційний.

Інформаційний напрямок. У межах розвитку інформаційного напрямку планується створити такі умови, за яких люди, незалежно від своєї мобільності, функціональних порушень чи комунікативних можливостей, зможуть отримувати доступ до інформації та користуватись усіма необхідними технологіями.

Усунення бар'єрів також передбачає роботу з міфами та стереотипами щодо тих чи інших груп населення. Згідно з опитуванням громадської організації людей з інвалідністю Fight For Right у партнерстві з Київським міжнародним інститутом соціології (КМІС), яке було проведено перед повномасштабним вторгненням у 2021 році, для 61% опитаних людей інвалідність асоціювалася з такими висловлюваннями: «непрацездатні», «люди з обмеженими можливостями», «люди, які не можуть себе самостійно обслужити», «люди, які потребують допомоги», «безпорадні», «недієздатні», «люди, які стикаються з життєвими труднощами», «люди з труднощами в спілкуванні» [10]. А у 2023 році соціологічна група «Рейтинг» в рамках проекту «Центр експертизи у сфері прав людей з інвалідністю» провела

«Національне соціологічне дослідження про сприйняття людей з інвалідністю в Україні» на замовлення Громадської спілки «Всеукраїнське об'єднання організацій в інтересах осіб з інвалідністю «Ліга сильних». Дослідження виявило, що дві третини опитаних позитивно сприймають військових з інвалідністю, відчуваючи при зустрічі з ними вдячність (60%), співчуття (50%), гордість (39%) та сум (28%) [3]. До цивільних з інвалідністю ставлення більш нейтральне і проявляється дещо інший спектр емоцій: співчуття – 71%, сум – 34%, надія – 15%. З іншого боку, всі респонденти з інвалідністю свідчать, що оточуючі у 71% демонструють жалість по відношенню до них [7]. Очевидно, що тенденції відношення до людей з інвалідністю змінюються, але ця тема потребує подальшої демаргіналізації для налагодження рівної інклюзивної взаємодії у суспільстві.

Серед заходів інформування суспільства щодо покращення побудованого середовища для людей з інвалідністю виділяють:

- аналіз кращих інклюзивних рішень на основі міжнародного досвіду;
- збір інформації про проблеми доступності до об'єктів міської інфраструктури для людей з обмеженою мобільністю;
- розвиток бази даних пропозицій та рішень щодо безбар'єрності та інклюзивності;
- посилення централізованого відкритого доступу до інформації для покращення мобільності інвалідів;
- підвищення якості життя людей з обмеженими можливостями;
- вдосконалення засобів інклюзивності для відповідності потребам всіх громадян, у тому числі людей з інвалідністю;
- розширення ефективної інформаційної взаємодії між суспільством та органами влади для вирішення проблем людей з інвалідністю;
- розвиток інформаційно-комунікаційних технологій;
- пошук нових шляхів впровадження інклюзії людей з інвалідністю на практиці у цілісний та інтегративний спосіб.

Суспільний і громадянський напрям розвитку передбачає створення рівних можливостей для активної участі всіх людей у громадському житті. Кожна людина вільна у своєму самовираженні і оточення не повинне її засуджувати внаслідок специфічних ознак. Різноманітні прояви людської особистості посилюють спільноту і сприяють розвитку суспільства в цілому.

Зараз людей з інвалідністю вже неможливо не помічати, як це було за часів «невидимих інвалідів», про що свідчить опитування: 50% опитаних дуже часто зустрічають людей з інвалідністю у повсякденному житті, 46% – зрідка і тільки 4% – ніколи [7]. Однак, у українського суспільства все ще немає достатнього досвіду адекватної взаємодії з людьми з інвалідністю, про що свідчить і неповне розуміння терміну «інклюзивність». Хоча 90% опитаних розуміє, що люди з інвалідністю здатні за певних умов вести таке ж активне життя, як і інші, однак ще немає уявлення про інклюзивність, як про форму спільного життя звичайних людей і людей з інвалідністю у суспільстві [3]. З одного боку, опитані демонструють високий ступінь схвалення соціальної інтеграції людей з інвалідністю та особистого комфорту у комунікації із ними, але водночас родичі та друзі людей з інвалідністю свідчать, що більшість інвалідів вважають себе нещасними [7]. Від респондентів з інвалідністю стало відомо, що головна їхня потреба бути видимими та прийнятими суспільством. Вони готові не

тільки розповідати про свої проблеми, але й безпосередньо залучатися в покращення безбар'єрності середовища для створення інклюзивного і справедливого суспільства з рівними можливостями для всіх [3]. Соціальний супровід є важливим джерелом психологічної підтримки, якої потребує людина з інвалідністю у повсякденному житті. Соціальна підтримка сприяє створенню інклюзивного середовища для людей з інвалідністю, в якому вони можуть інтегруватися в суспільство і користуватися своїми громадянськими, культурними, політичними, соціальними та економічними правами і обов'язками. Суспільний і громадянський напрям розвитку спрямовано на покращення якості життя людей з інвалідністю, зокрема:

- безбар'єрне спілкування;
- інтеграція людей з інвалідністю в суспільство;
- соціальні бізнес-моделі інтегровані з державними ресурсами та місцевими громадами;
- вимоги щодо доступності та інклюзії в межах політичної, законодавчої та стандартизаційної систем;
- формування контрольних списків потреб людей з інвалідністю;
- формування підґрунтя для конструктивних, соціальних та законодавчих змін;
- підвищення якості життя людей з обмеженими можливостями.

Фізичне середовище. Головним дискримінаційним моментом в українському суспільстві люди з інвалідністю вважають обмеження своєї мобільності, тобто можливості вільно пересуватись за межами помешкання, доступу до об'єктів публічного простору тощо [3]. Побудоване середовище (будівлі, вулиці, тротуари, транспорт) має бути фізично доступним для всіх людей, в тому числі для маломобільних груп населення. Інструменти оцінки інклюзії та індекси ефективності інклюзії інвалідності тестують міста та надають можливість розробити обґрунтовані коригувальні заходи для безбар'єрного міського дизайну з урахуванням потреб людей з інвалідністю [12]. Фізичний напрямок підтримки людей з інвалідністю передбачає розроблення єдиних архітектурних стандартів та включає такі аспекти:

- розробка обґрунтованих заходів для інклюзивного міського дизайну з урахуванням потреб людей з інвалідністю;
- сервісні моделі фізичної доступності з комунікаційними стратегіями та технічними пристосуваннями;
- архітектурна доступність житла;
- безшовне середовище;
- інклюзивний простір рівних можливостей;
- системи безбар'єрної доступності;
- єдина база безбар'єрних локацій;
- чек-лист безбар'єрності житла;
- інструменти оцінки інклюзії інвалідності;
- індекси ефективності інклюзії.

Освітній напрям розвитку інклюзивності. У кожної людини має бути вільний доступ до якісної освіти, причому впродовж всього життя для вдосконалення навичок та розширення можливостей. Згідно з опитуванням людей з інвалідністю, найкращі можливості для себе вони визначають саме у сфері освіти та навчання [3]. Водночас, 40% опитаних жінок та 24% опитаних

чоловіків з інвалідністю внаслідок інтелектуальних порушень не вміють читати [10]. Близько двох третин людей з порушеннями опорно-рухового апарату (64%) не відвідують культурні заклади та суспільні заходи. Менше половини людей з порушеннями зору (46%) та лише кожна п'ята людина з порушеннями опорно-рухового апарату (23%) були на культурних заходах, де враховувалися їхні особливі потреби. Більше третини людей з порушеннями зору (37%) вважають, що книг у доступному форматі могло б бути більше [7]. Таким чином, напрямок розвитку інклюзивної освіти має враховувати:

- програми перекваліфікації для дорослих з особливими потребами;
- центри перепрофілювання, реабілітації, навчання, відновлення та соціалізації військових;
- онлайн освіта з урахуванням потреб людей з обмеженими можливостями;
- безбар'єрність навчальних закладів;
- спеціалізована освіта для осіб з інвалідністю;
- інтеграція людей з інвалідністю в усі навчальні заклади.

Економічний напрямок розвитку інклюзії означає забезпечення таких умов, за яких людина може працевлаштуватись і відчувати себе захищеною від будь-яких проявів дискримінації. Передбачається створення можливостей для отримання фінансових та інших ресурсів для підприємницької діяльності широких верств населення. Згідно з дослідженням, людям з інвалідністю найменше шансів знайти роботу та займатися підприємництвом в Україні. Вони найчастіше стикаються з дискримінацією в процесі пошуку роботи, а працевлаштування людей з інвалідністю здебільшого носить номінальний характер для виконання квоти [3].

Водночас міжнародний та вітчизняний досвід доводить, що інклюзивно привітні організації за рахунок залучення інвалідів заробляють більше грошей. Поки Гітлер присипляв інвалідів, у Британії під час Другої світової війни працювало понад 750 000 інвалідів, у тому числі льотчик-випробувач з ампутованими ногами Дуглас Бадер, який був національним героєм. У Британії The Kings National Roll Scheme заохочувала підприємства працевлаштовувати колишніх військовослужбовців-інвалідів, а сучасні законодавчі ініціативи спрямовані на підвищення обізнаності бізнес-спільноти про переваги використання інклюзивної робочої сили [14]. Для розвитку інклюзивності в економічній сфері необхідно звертати увагу на такі аспекти:

- інформаційні ресурси про працевлаштування для людей з інвалідністю;
- державні програми по наданню роботи ветеранам;
- компенсація роботодавцям за створення робочих місць для людей з інвалідністю;
- стимулювання інклюзивно привітних організацій.

Цифрова безбар'єрність передбачає доступ усіх соціальних груп до широкого спектру онлайн послуг та інтернет можливостей та охоплює всі сфери Національної стратегії зі створення безбар'єрного простору. Аналіз ключових концепцій міжнародних ініціатив розумних міст (smart city) та методів управління даними дозволяє розробити соціальну бізнес-модель для людей з інвалідністю на основі мобільної сервісної платформи безбар'єрних комунікацій. Сучасні архітектурні концепції планування та проєктування для

створення безбар'єрного побудованого середовища використовують принципи розумного міста. Цифрова інфраструктура інклюзивного середовища включає такі аспекти:

- розробка системи інклюзивної інфраструктури на основі засобів розумного міста (smart city);
- індивідуальні послуги маршрутизації для доступу людей на інвалідних візках;
- мобільна сервісна платформа для безбар'єрних переміщень у побудованому середовищі;
- інтеграція інформаційно-комунікаційних технологій з постачальниками транспортних послуг для людей з інвалідністю;
- цілісна та інтерактивна інклюзія людей з інвалідністю;
- цифрові платформи для інклюзивного туризму та культурних заходів.

Наразі найбільш терміновим завданням у сфері цифрової безбар'єрності є налагодження онлайн системи документообігу для процедури отримання інвалідності для військових і цивільних травмованих внаслідок військових дій.

Контрольний список потреб та проблем людей з інвалідністю слугуватиме керівництвом для архітектурної концепції та планування розумного міста для створення об'єктів, доступних для людей з інвалідністю в приватних і громадських будівлях. Це сприятиме розвитку інклюзивності та безбар'єрності побудованого середовища України і допоможе поліпшити якість життя всіх людей, в тому числі людей з інвалідністю, а особливо військових, які отримали поранення на війні.

Дискусія

В процесі відбудови України та реабілітації постраждалих внаслідок війни доведеться вирішувати безпрецедентні виклики. Дві третини українців (66%) вважають, що держава повинна опікуватись проблемами людей з інвалідністю, а майже половина (49%) покладає відповідальність на органи місцевої або центральної влади [10]. Водночас безпосередньо люди з інвалідністю переважно розраховують на самих себе, що свідчить про зневіру по відношенню до держави та суспільства. Майже 60% опитаних зазначили, що люди з інвалідністю найбільше потребують фінансової допомоги, 50% – медичної, 40% – психологічної [3]. Більшість опитаних посередньо та погано оцінили загальний стан вирішення проблем та розвиток ініціатив для людей з інвалідністю. Зокрема, респонденти з інвалідністю часто пов'язували проблеми з реабілітацією не тільки з недостатнім фінансуванням, але й відсутністю реабілітаційних центрів у невеликих містах та непристосованістю лікарень до базових потреб інвалідів.

Відчутна різниця у сприйнятті суспільством військових та цивільних людей з інвалідністю, але загалом все більше уваги приділяється проблемам інвалідів в цілому. Водночас є певний дисбаланс уваги до різних аспектів інвалідності. Наприклад, більше уваги приділяється протезуванню і водночас менше обговорюють проблеми людей, які втратили слух або зір. За оцінкою німецької компанії Ottobock та її медичних партнерів, вартість протезування може сягати 50 тисяч євро, а виплат від держави у розмірі 20 тисяч євро не вистачає, тому люди змушені звертатися по допомогу до благодійних організацій [11].

Внаслідок війни значно збільшується кількість людей з інвалідністю, які не повинні відчувати обмежень, тому необхідно створити належні умови для їх життя. Вартість війни не може і не повинна вимірюватися виключно цифрами, але витрати на війну та на ліквідацію її наслідків вимагають колосальних фінансів. Недостатнє фінансування військових, які отримали жахливі поранення, це не тільки неповага до їх подвигів, але й ганьба для держави та суспільства. Військові, які втратили своє здоров'я на війні, повинні отримувати від всіх членів суспільства більше допомоги та підтримки. Наші герої повинні відчувати впевненість, що держава і всі громадяни України їм глибоко вдячні і зроблять все можливе для забезпечення комфортного життя і самореалізації.

Люди з обмеженою мобільністю потребують постійної соціальної підтримки у повсякденному житті. В багатьох країнах розроблено індикатори інклюзивності міст, стандарти безбар'єрності міського середовища та цифрові інструменти підтримки інклюзивності [12]. Безбар'єрність для людей з інвалідністю в приватних і громадських будівлях зробить наші міста розумнішими та інклюзивнішими і допоможе поліпшити якість життя для всіх людей, особливо для ветеранів. У розумному місті інтерактивна доступна інфраструктура створює інклюзивне середовище для людей з інвалідністю, в якому вони можуть інтегруватися в суспільство, реалізуючи свої громадські, культурні, політичні, соціальні та економічні права і обов'язки. Це допоможе громадянам України, постраждалим внаслідок війни, адаптуватись до життя, знизити посттравматичний синдром, підвищити якість життя. Адаптуючи кращий міжнародний досвід архітектурної інклюзивності, Україна може стати взірцем безбар'єрності після відбудови та реконструкції міст.

Висновки

Визначено п'ять етапів розвитку інклюзивності в Україні і відзначено, що безбар'єрність в Україні є обґрунтованою необхідністю для інтеграції людей з інвалідністю в соціальні, економічні та екологічні аспекти бізнесу та держави, що покращує стандарти для всіх громадян.

Проаналізовано Національну стратегію зі створення безбар'єрного простору, що передбачає усунення бар'єрів у шести основних напрямках: фізичний, суспільний, економічний, освітній, цифровий, інформаційний. При створенні інклюзивної інфраструктури слід тісно співпрацювати з місцевими громадами, оскільки в залежності від регіону вирізнятиметься ступінь руйнування інфраструктури та кількість людей з обмеженою мобільністю.

Інтерактивна доступна інфраструктура створює інклюзивне середовище для людей з інвалідністю, в якому вони можуть інтегруватися в суспільство, реалізуючи свої громадські, культурні, політичні, соціальні та економічні права і обов'язки. Доступність поширюється на умови навчання і праці, житло, громадські заклади, інфраструктуру та міське середовище.

За роки війни сотні тисяч українців отримали серйозні травми, а десятки тисяч стали інвалідами, тому в процесі реабілітації постраждалих та відбудови доведеться вирішувати безпрецедентні виклики, але, адаптуючи кращий міжнародний досвід архітектурної інклюзивності, наша країна може стати взірцем безбар'єрності.

Безбар'єрність потрібна всьому суспільству, оскільки розвиток інклюзивного і стійкого побудованого середовища покращує стандарти для

всіх та забезпечує гідний рівень якості життя для інвалідів, а загалом інклюзія передбачає усунення бар'єрів та розробку конкретних рішень для рівноправного залучення всіх громадян у різноманітні сфери життя.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Альбом безбар'єрних рішень [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bcl.com.ua/albomrozdil1/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
2. Громадська організація дослідження комфорту «ЛУН Місто» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://misto.lun.ua/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
3. Громадська спілка «Всеукраїнське об'єднання організацій в інтересах осіб з інвалідністю «Ліга сильних» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ls.org.ua/centre/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
4. ДБН В.2.2-40:2018. «Будинки і споруди. Інклюзивність будівель і споруд» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_2_40/1-1-0-1832. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
5. Довідник безбар'єрності. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://bf.in.ua/?fbclid=IwAR0eG--wXXFCzmhrsKHUIq0ajbPHIuJj2TqPkqfYSCVEv2fWpb6W1C-P2_c. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
6. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо прав інвалідів». – Відомості Верховної Ради. – 2012. – №31. – С. 381.
7. Київський міжнародний інститут соціології (КМІС) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kiis.com.ua/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
8. Проект Закону України №6458 «Про здійснення комплексної реконструкції кварталів (мікрорайонів) застарілого житлового фонду» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=73497. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
9. EIDD Design for All Europe [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dfaueurope.eu/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
10. Fight For Right [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ffr.org.ua/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
11. Houpr Foundation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://houpr.org/uk/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
12. Rebernik N., Szajczyk M., Bahillo A., Goličnik Marušić B. Measuring disability inclusion performance in cities using disability inclusion evaluation tool (DIETool). – Sustainability. – 2020. – №12.4. – P. 1378.
13. The EIDD Stockholm Declaration [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dfaueurope.eu/what-is-dfa/dfa-documents/the-eidd-stockholm-declaration-2004/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.
14. The role of disabled people in economic growth [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/cdp-2018-0038/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 20.03.2024.

Стаття надійшла до редакції 06.02.2024 і прийнята до друку після рецензування 22.04.2024

REFERENCES

1. An album of barrier-free solutions. Retrieved 2024, March 20 from <https://bcl.com.ua/albomrozdil1> [in Ukrainian].
2. Non-governmental organization of comfort research "LUN City". Retrieved 2024, March 20 from <https://misto.lun.ua/> [in Ukrainian].

3. Public union "All-Ukrainian Association of Organizations in the Interest of Persons with Disabilities "League of the Strong". Retrieved 2024, March 20 from <https://ls.org.ua/centre/> [in Ukrainian].
4. State building regulations B.2.2-40:2018. "Buildings and structures. Inclusiveness of buildings and structures". Retrieved 2024, March 20 from https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_2_40/1-1-0-1832 [in Ukrainian].
5. Barrier-free guide. Retrieved 2024, March 20 from https://bf.in.ua/?fbclid=IwAR0eG--wXXFCzmhrsKHUIq0ajbPHIuJj2TqPkqfYSCVEv2fWnb6W1C-P2_c [in Ukrainian].
6. The Law of Ukraine «On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Rights of Disabled Persons». (2012). Verkhovna Rada information. №31. P. 381. [in Ukrainian].
7. Kyiv International Institute of Sociology (KIIS). Retrieved 2024, March 20 from <https://kiis.com.ua/> [in Ukrainian].
8. Draft Law of Ukraine No. 6458 «On the implementation of comprehensive reconstruction of neighborhoods (microdistricts) of outdated housing stock». Retrieved 2024, March 20 from https://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=73497 [in Ukrainian].
9. EIDD Design for All Europe. Retrieved 2024, March 20 from <https://dfaeurope.eu/>
10. Fight For Right. Retrieved 2024, March 20 from <https://ffr.org.ua/>
11. Houp Foundation. Retrieved 2024, March 20 from <https://houp.org/uk/>
12. Rebernik, N., Szajczyk, M., Bahillo, A., Goličnik Marušić, B. (2020). Measuring disability inclusion performance in cities using disability inclusion evaluation tool (DIETool). *Sustainability*, 12.4, 1378.
13. The EIDD Stockholm Declaration. Retrieved 2024, March 20 from <https://dfaeurope.eu/what-is-dfa/dfa-documents/the-eidd-stockholm-declaration-2004/>
14. The role of disabled people in economic growth. Retrieved 2024, March 20 from <https://commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/cdp-2018-0038/>

The article was received 06.02.2024 and was accepted after revision 22.04.2024

Кривомаз Тетяна Іванівна

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

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

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

Ільченко Ігор Святославович

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

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

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

Циба Артем Миколайович

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

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

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

Гамоцький Роман Олегович

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

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

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

Гетьман Єлизавета Андріївна

студентка Київського національного університету будівництва та архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-0960-0846> **e-mail:** liza.getman13@gmail.com

УДК 712.5:631.347:502.5

Marina Kravchenko, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> *e-mail*: marina-diek@ukr.net

Tetiana Tkachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> *e-mail*: tkachenkoknuba@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF METHODS FOR QUANTIFYING THE EFFECTIVENESS OF RAIN GARDEN DESIGN IN THE CONTEXT OF RAINWATER MANAGEMENT

***Abstract.** Rain gardens are a common green infrastructure practice used in urban environments to address water quality and hydrological impacts of stormwater. This goal is achieved by designing structures that consist of an upper plant layer planted in a soil environment with or without a drainage system. Rain gardens provide three main functions in stormwater management: reducing the volume of rainwater runoff from the catchment area; reducing the rate of peak water flows in the sewer system, which is of particular importance for preventing hydrological overloading of the sewer network; and controlling water quality, which contributes to groundwater conservation. The design of rain gardens is based on the parameters and requirements associated with these functions. The structure is defined in detail and an appropriate design method is chosen to ensure optimal parameters such as size and depth. A scientometric analysis of studies, including various numerical models, shows that key original scientific contributions come from different countries, so most rain garden designs installed in different geographical areas are based on general recommendations, which often leads to operational failures. This work aims to model the calculation of the main parameters of rain garden design and methods for quantifying hydrological efficiency for stormwater management and support widespread implementation in the urban environment. A numerical model has been developed that allows calculating the effective area of a rain garden structure for a single rain event under the condition that the structure is not overfilled and does not leak. Methods for assessing the three main functions of rain gardens in the field of stormwater management are proposed: a method for assessing the reduction of stormwater runoff; a method for assessing the reduction of annual runoff; a method for assessing the reduction of peak runoff; and a method for assessing the reduction of the total amount of pollutants by the rain garden structure.*

***Keywords:** rain garden, rainwater, stormwater management, modeling, rain garden parameters.*

© М.В. Кравченко, Т.М. Ткаченко, 2024

М.В. Кравченко, Т.М. Ткаченко

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

РОЗРОБКА МЕТОДІВ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ДОЩОВОГО САДУ У КОНТЕКСТІ УПРАВЛІННЯ ДОЩОВИМИ ВОДАМИ

***Анотація.** Дощові сади – це поширена практика «зеленої» інфраструктури, яка використовується в міських умовах навколишнього середовища для вирішення проблем, пов'язаних з якістю води та гідрологічним впливом зливових вод. Ця мета досягається проєктуванням конструкцій, які складаються з верхнього рослинного шару, висадженого в ґрунтовому середовищі з дренажною системою або без неї. Конструкції дощових садів забезпечують три основні функції в галузі управління зливовими водами: зменшення обсягу стоку дощової води з площі водозбірного басейну; зменшення швидкості пікових потоків води в каналізаційній системі, що має особливе значення для запобігання гідрологічному перевантаженню каналізаційної мережі; контроль якості води, що сприяє збереженню підземних вод. Проєктування дощових садів ґрунтується на параметрах та вимозах, пов'язаних із зазначеними функціями. При цьому детально визначається його структура та обирається належний метод розрахунку, спрямований на забезпечення оптимальних параметрів, таких як розмір і глибина. Наукометричний аналіз досліджень, включаючи різні числові моделі, показує, що ключові оригінальні наукові внески походять від різних країн, тому більшість конструкцій дощових садів, встановлених у різних географічних районах, базуються на загальних рекомендаціях, що часто призводить до операційних збоїв. Метою роботи є моделювання розрахунку основних параметрів конструкції дощового саду та методів кількісної оцінки гідрологічної ефективності для управління зливовою водою і підтримки широкого впровадження в міському середовищі. Розроблено числову модель, яка дозволяє розраховувати ефективну площу конструкції дощового саду для однієї дощової події та при умові відсутності переповнення конструкції з уникненням її витікання. Запропоновано методи оцінки трьох основних функцій дощових садів в сфері управління зливовими водами: метод оцінки зменшення об'єму зливого стоку; метод оцінки скорочення річного об'єму стоку; метод оцінки зниження об'єму пікового стоку та метод оцінки зниження загальної кількості забруднюючих речовин конструкцією дощового саду.*

***Ключові слова:** дощовий сад, дощова вода, управління зливовими водами, моделювання, параметри дощового саду.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.19-35>

Вступ

Управління дощовими водами стало важливим питанням у міських та приміських районах завдяки швидкому урбанізованому розвитку, що значно збільшує непроникність поверхні та призводить до підвищення частоти міських повеней [1]. Однією з найбільш проблематичних змін у кругообігу води в міських умовах є зниження швидкості інфільтрації, тобто швидкості, з якою вода рухається вертикально в ґрунтове середовище. Без поверхневої інфільтрації зменшується поповнення ґрунтових вод, випаровування та збільшується поверхневий стік, що призводить до втрати води з місцевої

системи. Зменшення інфільтрації є особливо актуальною проблемою у містах з комбінованими каналізаційними системами, які швидше перевантажуються стоками, що призводить до викиду неочищеної води безпосередньо в навколишні водні шляхи. Проте ці проблеми можуть бути частково вирішені за допомогою заходів, які дозволяють сповільнювати рух води через міські екосистеми за допомогою «сірої» або «зеленої» інфраструктури. Сіра інфраструктура, до якої відноситься система каналізаційних трубопроводів та водоочисні споруди, є ефективною, але досить дорогою з фінансової точки зору, особливо коли потрібен ремонт або повна модернізація [2].

«Зелена» інфраструктура (ЗІ) відноситься до методів, спрямованих на відновлення гідрологічного циклу шляхом включення природних компонентів у міський ландшафт, що може збільшити перехоплення та інфільтрацію опадів [3]. Це відносно новий підхід, який набув популярності як ефективний засіб зменшення руйнівних наслідків повеней та досягнення кращого балансу між потребами урбанізації та потребами природи [4].

Останніми роками кількість досліджень, що стосуються практики ЗІ в управлінні дощовими водами, прогресивно зростає. Як нещодавній приклад, автори [5] провели всебічний огляд літератури, що стосується ЗІ, дослідивши статті, опубліковані з 1995 по 2019 рік. Аналіз робіт, пошук яких автори здійснювали на основі ключових слів, вказує на те, що більшість статей зосереджено на дослідженні «зеленої» інфраструктури в сфері управління зливовими водами. Наукометричний огляд робіт, пов'язаних з ЗІ, опублікованих у 1999–2021 роках, нещодавно завершили і автори [6], надавши багато корисної інформації з цієї тематики. А в рамках дослідження [7] було вивчено роль ЗІ в управлінні ризиками міських повеней. Автори проаналізували особливості використання ЗІ для зменшення проблем затоплення міст, дослідивши низку викликів і пріоритетів, які необхідно вирішити, щоб включити ЗІ у поточні системи управління зливовими водами.

«Зелена» інфраструктура включає будь-яку систему, яка забезпечує позитивні або стійкі екологічні переваги, включаючи такі як водопроникний тротуар, резервуари для дощової води та сонячні панелі, проте термін «зелений» безпосередньо відноситься до типів інфраструктури, де рослинність є невід'ємною частиною їх дизайну та функціонального забезпечення. До таких систем ЗІ відносяться міські сади, парки, ліси, заповідники, а також системи, які включають інженерні компоненти, такі як «зелені» конструкції, біозахисні смуги, водно-болотні угіддя [8, 9].

«Зелені» конструкції – це біотехнічні системи, в яких конструкції будівель і споруд та окремі елементи поєднані з живими рослинами, складаючи єдину систему живої і неживої складової біогеоценозів сучасних міст в концепції сталого розвитку [10].

Такі види «зелених» конструкцій, як «зелені» дахи та дощові сади, належать до біоретенційних систем на основі вертикальної інфільтрації води з поверхневим її утриманням шаром рослинності. Вони широко обговорюються в технічній і науковій літературі [11, 12], де стверджується, що запровадження «зелених» конструкцій може бути перспективним рішенням для зменшення негативних наслідків урбанізації і, зокрема, для управління дощовими опадами, особливо низької та середньої інтенсивності, які можуть становити більшу частину річного обсягу [13, 14].

Дощові сади, які часто називають системами біоутримання або біоінфільтрацією, були рекомендовані для локального контролю зливових стоків, безпосередньо біля джерела, через їх економічну ефективність і позитивний вплив на відновлення екосистем [15].

Зазвичай ці конструкції розташовують у місцевості низовин, і завдяки процесам інфільтрації та адсорбції, що відбуваються в системі «рослини – мікробна популяція – структурні шари», досягається ефективне очищення дощової води на обмеженій площі. Дощові сади, в основному, використовуються для управління дощовою водою, що стікає з поверхні до 1 га. До основних переваг дощових садів можна віднести:

- зменшення обсягу стоку дощової води з площі водозбірного басейну [16];
- зменшення швидкості пікових потоків води в каналізаційній системі, що має особливе значення для запобігання гідрологічному перевантаженню каналізаційної мережі [17];
- контроль якості води, що сприяє збереженню підземних вод [18].

Наприклад, авторами [19] було оцінено ефективність дощового саду, в який стікає злизова вода з території автостоянки, та показано зниження пікових швидкостей потоку води з паркінгу на 99%. Дослідження, проведене авторами [20] за допомогою моделі Storm Water Management Model (SWMM) Агентства з охорони навколишнього середовища США з використанням дощових садів, вказує на те, що навіть незначні зміни параметрів дощового саду, такі як ступінь водопроникності, розміри шарів та вибір матеріалів, суттєво впливають на змодельований піковий потік.

Відсоткове зменшення об'єму злизової води, що відводиться з площі водозбірного басейну за рахунок використання дощових садів, залежить від інтенсивності опадів та їх тривалості, а також від конструктивних особливостей дощового саду. Ефективність зменшення об'єму стоку була досліджена в окремих роботах [21–23].

За даними авторів [22], загальний відсоток зменшення обсягу стоку знаходиться в діапазоні від 50 до 98% для різних досліджень. За даними [23], зменшення обсягу стоку за допомогою дощових садів знаходиться в діапазоні від 23 до 97%, залежно від кліматичних умов, в яких проводились дослідження. Отже, використання таких рішень, як конструкції дощових садів, дозволяє знизити ймовірність перевантаження дощової або комбінованої каналізаційної інфраструктури, частково вирішивши проблему управління міськими дощовими водами [24].

Інші переваги конструкцій дощового саду включають: покращення естетики району за рахунок озеленення, покращення середовища існування дикої природи, зменшення ерозії ґрунту та поповнення ґрунтових вод [25] і, таким чином, збільшення базових потоків до місцевих водних шляхів.

Класична конструкція дощового саду складається з наступних елементів (рис. 1):

- *глибина шару для води* або шар для утворення стовпа води – це шар, призначений для стікання і утворення стовпа води, що дозволяє зменшити швидкість її потоку для інфільтрації в нижні шари конструкції;

- *ґрунтопокривні матеріали*: шар мульчі/гальки/каміння, який використовується для пом'якшення ерозії ґрунту та забезпечення естетичного вигляду дощового саду. Додатково може бути доповнений гравієм для зменшення поверхневої ерозії;

- *рослинний покрив*: покрив з багаторічних рослинних видів, які дозволяють ефективно контролювати ерозію ґрунту, стабілізувати його фізико-хімічні властивості, збільшуючи інфільтрацію, а також затримувати забруднюючі речовини у зливових водах, перш ніж вони потраплять у нижні шари конструкції;

- *трав'яний покрив*: додатковий шар трав'яного покриву для доповнення дизайну дощового саду та зменшення швидкості потоку зливної води;

- *ґрунтова суміш*: поживне середовище для вирощування рослин, яке, зазвичай, є сумішшю ґрунту, піску, супіску чи суглинку;

- *інфільтраційний шар*: шар, призначений для підвищення ефективності водопроникності ґрунтового шару. Цей шар, як правило, складається з дрібного гравію або крупнозернистого піску, оскільки, окрім того, що він повинен бути добре дренажним, він має бути і достатньо міцним, щоб витримати вагу верхніх шарів;

- *гравійний шар*: шар середнього чи крупного гравію, призначений для утримання та тимчасового зберігання води з подальшим її відведенням до дренажної системи;

- *дренажна система*: інженерно-технічна конструкція, призначена для збору і відведення інфільтрованої води з дощового саду. Під кожним дощовим садом може бути розташовано резервуари для накопичення відведеної з дренажної системи води, яку можна використовувати як технічну для побутових потреб (якщо дощовий сад розташований біля житлового будинку), для миття автомобілів (якщо дощовий сад розташований біля СТО, автозаправки), для поливу та зрошення ділянок із зеленими насадженнями магістральних вулиць, де подача води обмежена (якщо дощовий сад розташований вздовж автомагістралей).

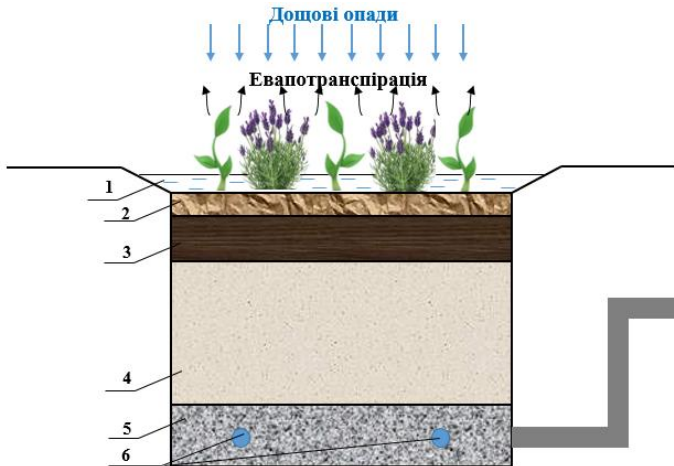


Рис. 1. Основні елементи конструкції дощового саду в перерізі (авторська розробка): 1 – шар для утворення стовпа води; 2 – шар ґрунтопокривних матеріалів; 3 – шар ґрунтової суміші для висадки рослин; 4 – інфільтраційний/проміжний шар; 5 – шар гравію; 6 – дренажна система

Проектування дощових садів ґрунтується на параметрах та вимогах, пов'язаних із зазначеними функціями. При цьому детально визначається його структура та обирається належний метод розрахунку, спрямований на

забезпечення оптимальних параметрів, таких як розмір і глибина. Одним із основних методів таких розрахунків є чисельне моделювання, підходи до якого залишаються найбільш широко використовуваним інструментом, що дозволяє підтримувати та вдосконалювати процеси планування, проектування і управління в напрямку концепції сталого розвитку.

Моделювання має вирішальне значення для досліджень, пов'язаних із дощовими садами, оскільки цей метод допомагає передбачити та оцінити особливості гідрології і якості води систем, що працюють у різних умовах [26, 27]. Крім того, моделювання допомагає розробити низку робочих умов і отримати відповідні дані для підвищення ефективності застосування дощових садів, що не завжди можна отримати експериментальним шляхом. Ця інформація має важливе значення для інженерів, дизайнерів, проєктувальників систем водовідведення та спеціалістів, які впроваджують конструкції дощових садів, спеціально розроблені для конкретних потреб.

Метою роботи є моделювання розрахунку основних параметрів конструкції дощового саду та методів кількісної оцінки гідрологічної ефективності для управління зливовою водою і підтримки широкого впровадження в міському середовищі.

Основна частина

Розрахунок відповідної площі конструкції дощового саду, як засобу губки, має важливе значення в процесі прийняття рішень щодо вирішення проблем міського управління дощовими водами. Згідно з характеристикою структури дощових садів, метод інфільтрації на основі закону Дарсі є найбільш поширеним у більшості країн світу та дозволяє розраховувати площу дощового саду, яку в літературі позначають як A_f (m^2) [28] та визначають згідно з рівнянням:

$$A_f = \frac{A_d \cdot H \cdot \varphi \cdot d_f}{K \cdot (h + d_f) \cdot t_f}, \quad (1)$$

де A_d – водозбірна площа, m^2 ; φ – коефіцієнт стоку; d_f – глибина дощового саду, включаючи шар ґрунту для висадки рослин, м; K – коефіцієнт водопроникності шару ґрунту, м/с; h – середня глибина водоносного шару, що дорівнює половині максимальної глибини ($h = h_{max}/2$), м; t_f – час просочування води з водоносного шару через ґрунт, с.

Цей метод базується на інфільтраційній здатності та використанні закону Дарсі, але він ігнорує потенціал структурного розташування та вплив рослин на водоносний шар.

Окрім вищезазначеного методу, існують ще два досить поширені підходи, такі як метод розрахунку ефективного об'єму поверхневого утримуючого шару дощових садів, запропонований авторами [29], та метод оцінки пропорцій на основі використання величини площі водозбору, описаний в посібнику з проектування конструкцій для очищення зливових вод [30].

Метод розрахунку ефективного об'єму поверхневого утримуючого шару базується на рівнянні водного балансу з використанням об'єму водоносного шару для зменшення стоку. Цей метод враховує вплив рослин, але не враховує інфільтраційну та затримувальну здатність дощового саду, яка в основному використовується для обробки стоку першого змиву, при якому опади

становлять близько 12 мм. Метод оцінки пропорцій є простим методом, що врахує площу водозбору, помножену на відповідний коефіцієнт пропорційності. При цьому точність методу невисока і він має обмежену застосовність до характеристик опадів та різних стандартів.

Вищезазначені три методи, які базуються на законі Дарсі, мають свої особливості, але також і обмеження. Вибір методу може бути здійснено шляхом аналізу структурних характеристик дощового саду, його функціональної спрямованості, стандартів проектування, характеристик ґрунту та інших факторів. Метод інфільтрації на основі закону Дарсі підходить для дощових садів з піщаним ґрунтом; метод розрахунку ефективного об'єму поверхневого утримуючого шару підходить для дощових садів з глинистими ґрунтами та достатньо великими площами; метод оцінки пропорцій в основному використовується для оцінки розрахунків з відомими та розгорнутими параметрами дощового саду.

Розрахунок ефективної площі дощового саду повинен включати процес інфільтрації, вплив рослинного покриву на водоносний горизонт, об'єм басейну води та інші фактори, тому було розроблено метод повного водного балансу, що включає інфільтрацію та утримання води. Для того, щоб досягнути максимально ефективного об'єму утримання води дощовим садом, будемо вважати, що коефіцієнт водопроникності $K \geq 1 \cdot 10^{-5}$, м/с, а зливовий потік з непроникної поверхні збирається в дощовий сад, що зверху донизу складається з наступних шарів: рослинний покрив, шар для утворення стовпа води, шар ґрунтової суміші для висадки рослин, інфільтраційний/проміжний (піщаний) шар та шар гравію.

До моменту, коли дощовий стік виходить за межі накопичувальних та інфільтраційних можливостей дощового саду і вода починає переповнювати розрахункову область (рис. 2), існує баланс між гідрологічними елементами, який можна описати у вигляді рівняння:

$$V + V_1 = X + Y + Z + V_2 + W_1, \quad (2)$$

де V – об'єм дощового стоку, що збирається в конструкцію дощового саду за розрахункові періоди, м³; V_1 – об'єм стоку, накопичений дощовим садом на початку розрахункових періодів, м³; X – об'єм інфільтрованої дощової води за розрахункові періоди, м³; Y – об'єм випаровування з дощового саду протягом розрахункових періодів, м³; Z – об'єм дощової води, яка насичує товщу сипучої ґрунтової суміші за розрахункові періоди, м³; V_2 – об'єм утриманої дощової води конструкцією дощового саду в кінці розрахункових періодів, м³; W_1 – об'єм переливу дощової води протягом розрахункових періодів, м³.

Оскільки розрахунковий період може не збігатися з моментом початку дощової події, об'єм випаровування можна вважати мінімальним, тому величиною Y можна знехтувати. При проектуванні конструкції дощового саду об'єм переливу дощової води W_1 можна вважати рівним 0. Якщо припустити, що на початок розрахункового періоду в конструкції дощового саду води не було ($V_1 = 0$) і об'єм рівня води від початку до кінця розрахункового періоду був V_{bassin} , то, враховуючи, що $V_{bassin} = V_2 - V_1$, можна записати $V_{bassin} = V_2$. Тоді рівняння (2) приймає вигляд:

$$V = X + Z + V_{bassin}. \quad (3)$$

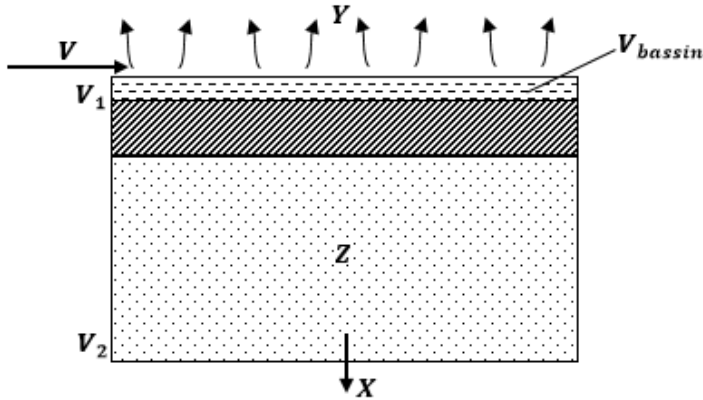


Рис. 2. Схематична модель, яка використовувалась для розробки моделі розрахунку площі конструкції дощового саду

Кількість опадів на одиницю площі дощового саду R_Y , $\text{м}^3/\text{м}^2$, протягом розрахункових періодів можна визначити, враховуючи інтенсивність опадів $q(T)$ для відповідного кліматичного району та інтегруючи (3):

$$R_Y = \int_0^{\tau} q(T) dT, \quad (4)$$

де τ – розрахунковий період, хв; T – тривалість опадів, хв.

Об'єм дощового стоку, що збирається в конструкції дощового саду за розрахункові періоди, розраховується згідно з рівнянням (5):

$$V = A_{bassin} \cdot R_Y \cdot \varphi \cdot 10^{-4}, \quad (5)$$

де A_{bassin} – площа басейну водозбору конструкції дощового саду, м^2 ; φ – коефіцієнт стоку.

Розрахунок об'єму інфільтрованої дощової води за розрахункові періоди показано у вигляді формули (6):

$$X = \frac{K \cdot (h_{sponge} + h) \cdot A_{sponge} \cdot \tau \cdot 60}{h_{sponge}}, \quad (6)$$

де K – коефіцієнт водопроникності шару ґрунтової суміші для висадки рослин, $\text{м}/\text{с}$; h_{sponge} – глибина дощового саду, м ; h – середня глибина водоносного шару (шару для утворення висоти стовпа води), м ; A_{sponge} – площа дощового саду, як засобу-губки, м^2 ; τ – розрахунковий період, хв, який часто розраховується відповідно до кількості опадів протягом 120 хв.

Відповідно до особливостей конструкції дощового саду та різних фізико-хімічних властивостей ґрунтового середовища, значення K , введене у формулі (6), можна описати, виходячи з наступних трьох умов:

1. При умові, що в конструкції дощового саду передбачено шар з непроникної геотекстильної мембрани або коефіцієнт проникності інфільтраційного шару K_2 значно менше коефіцієнта водопроникності ґрунтової суміші для висадки рослин K_1 , тобто $K_2 \ll K_1$ (за інших умов, переважно, $K_2 > K_1$), K_2 можна вважати обмежуючим фактором і об'ємом інфільтрованої дощової води X можна знехтувати, тобто $X = 0$.

2. При умові, що в конструкції дощового саду передбачена дренажна система для збору та відведення дощової води або $K_2 \gg K_1$, можна вважати, що $K = K_1$.

3. При умові, що $K_2 < K_1$, можна вважати, що $K = K_2$.

При умові, що об'єм стоку в конструкції дощового саду перевищує об'єм інфільтрованої води в шарах конструкції за той самий період, дощовий стік неминуче залишається в системі. Припустимо, що висота рослинного покриву в дощовому саду перевищує висоту шару для утворення стовпа води, тоді розрахунок фактичного об'єму V_{bassin} показано у вигляді формули (7):

$$V_{bassin} = A_{sponge} \cdot h_{max} \cdot (1 - f_v) \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

де h_{max} – максимальна глибина шару для утворення стовпа води; f_v – відсоток площі поперечного перерізу рослинного покриву від площі поверхні шару для утворення стовпа води, що зазвичай дорівнює 20%.

Об'єм дощової води, яка насичує товщу сипучої ґрунтової суміші за розрахункові періоди, визначається як

$$Z = n \cdot A_{sponge} \cdot h_{sponge}, \quad (8)$$

де n – середня пористість шару ґрунтової суміші для висадки рослин та інфільтраційного шару, яку приймають для розрахунку, зазвичай, 0,3.

Враховуючи наведені вище формули, розрахунок площі дощового саду, як засобу губки, показано за формулою (9):

$$A_{sponge} = \frac{A_{bassin} \cdot R_Y \cdot \varphi \cdot h_{sponge}}{60 \cdot K \cdot \tau (h_{sponge} + h) + h_{max} \cdot (1 - f_v) \cdot h_{sponge} + n \cdot h_{sponge}^2}. \quad (9)$$

При умові, що $X = 0$, тобто $K = 0$, формула (9) може бути змінена на:

$$A_{sponge} = \frac{A_{bassin} \cdot R_Y \cdot \varphi}{h_{max} \cdot (1 - f_v) + n \cdot h_{sponge}}. \quad (10)$$

Запропонований метод розрахунку площі конструкції дощового саду розроблено для однієї дощової події та при умові відсутності переповнення конструкції дощового саду водою і уникнення її витікання. Розроблений метод рекомендовано також для використання розрахунку ефективної площі конструкції дощового саду для ситуації, коли вода з очищеного дощового стоку буде збиратися в резервуар для повторного використання. Варто враховувати, що дощові сади призначені для часто повторюваних опадів, а не для окремих екстремальних подій, тому при розрахунку ефективної площі конструкції дощового саду кількість опадів слід обирати з урахуванням загальних місцевих характеристик опадів.

Так як конструкція дощового саду забезпечує три основні функції в сфері управління зливовими водами: зменшення об'єму зливого стоку, зменшення швидкості пікового стоку та зменшення загального вмісту забруднюючих речовин у воді, нами розроблено метод оцінки кількісних розрахунків для цих функцій.

Метод оцінки зменшення об'єму зливого стоку конструкцією дощового саду. Припустимо, що розрахунковий період повтору певної дощової події дорівнює N_1 , а відповідна кількість опадів при цьому складає R , мм. Період

повтору N_1 – це проміжок часу, виражений у роках, за який очікується, що певна дощова подія з відповідною кількістю опадів буде повторена або інтенсивність якої буде перевищено, в порівнянні з попередньою.

Крива, яка описує зміну інтенсивності дощового стоку в залежності від витрат дощової води Q , $\text{м}^3/\text{с}$, та тривалості опадів T , хв, представлена на рисунку 3.

Прийнявши відповідну площу дощового саду як A_{sponge1} та об'єм утриманої дощовим садом води як U_1 , відповідно до формули (2) рівняння водного балансу можна записати як $U_1 = X + V_{\text{bassin}} + Z$. Значенням X можна знехтувати, якщо на дно конструкції дощового саду влаштувати шар водонепроникної мембрани або при умові, що $K_2 \ll K_1$.

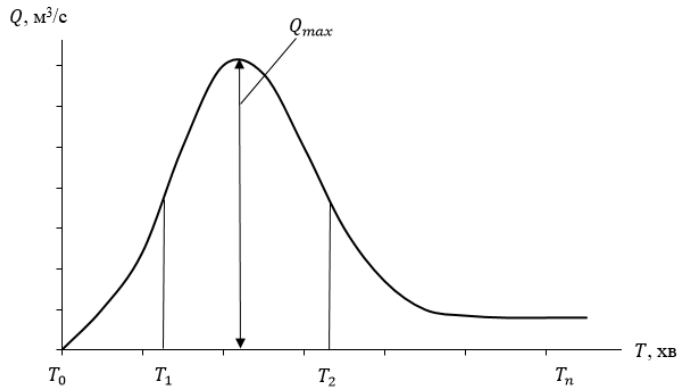


Рис. 3. Крива інтенсивності дощового стоку

При умові, що період повтору дощової події $N \geq N_1$, можна вважати, що $U' = U_1$. В іншому випадку, при умові, що період повтору $N \leq N_1$, можна вважати $U' = U$. І коефіцієнт зменшення об'єму зливого стоку можна записати як відношення:

$$\eta = \frac{U'}{U} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де U' – об'єм стоку, утриманого конструкцією дощового саду, м^3 ; U – об'єм вихідного стоку, м^3 .

Метод оцінки скорочення річного об'єму стоку. При розробці методу оцінки скорочення річного об'єму стоку було використано метод розрахунку добової кількості опадів. Якщо розрахункова кількість опадів становить R , мм, то на основі даних кліматичних спостережень та довготривалої статистики опадів можна вважати, що: за рік випало n опадів; кількість опадів, що перевищувала або дорівнювала R , мм, становила a ; кількість опадів, менших за R , мм, була b , тоді $n = a + b$, а відповідна кількість опадів для кожної дощової події становить R_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Якщо немає даних про кількість опадів на певній кліматичній території, цю інформацію можна отримати з даних про щоденну кількість опадів, які, у випадку України, оновлюються на сайті [31]. Тоді річний об'єм зменшення стоку та коефіцієнт річного скорочення стоку представлені у формулах (12) та (13) як:

$$U'' = a \cdot \varphi \cdot R \cdot A_{bassin} + \sum_{i=1}^b \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin}. \quad (12)$$

$$\eta' = \frac{U''}{\sum_{i=1}^n \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin}} \cdot 100\% = \frac{a \cdot R + \sum_{i=1}^b R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \cdot 100\%, \quad (13)$$

де U'' – річний об'єм зменшення зливого стоку, м³; η' – коефіцієнт річного скорочення стоку.

Метод оцінки зниження об'єму пікового стоку конструкцією дощового саду. Враховуючи об'єм утриманої дощовим садом води та об'єм пікового стоку, крива, яка описує процес зменшення пікового стоку води під час дощової події, представлена на рисунку 4.

Об'єм утриманої дощовим садом води U_1 можна записати як:

$$U_1 = \varphi \cdot A_{bassin} \cdot \int_{T_0}^{T_n} q(T) dT, \quad (14)$$

де T_0 – час початку утворення дощового стоку, хв; T_n – тривалість стоку, хв.

Об'єм стоку, який залежить від об'єму води, утриманої конструкцією дощового саду, відповідає розміру заштрихованої ділянки, як показано на рисунку 4. Тоді об'єм пікового стоку, що відповідає часу T_2 , та відповідний коефіцієнт зниження пікового рівня стоку описані наступними формулами:

$$Q' = Q_{max} - U_1. \quad (15)$$

$$\theta = \frac{Q_{max} - Q'}{Q_{max}}, \quad (16)$$

де Q' – об'єм утриманого пікового стоку, м³; Q_{max} – максимальний об'єм пікового стоку, м³; U_1 – об'єм утриманої дощовим садом води, м³; θ – коефіцієнт зниження пікового рівня стоку.

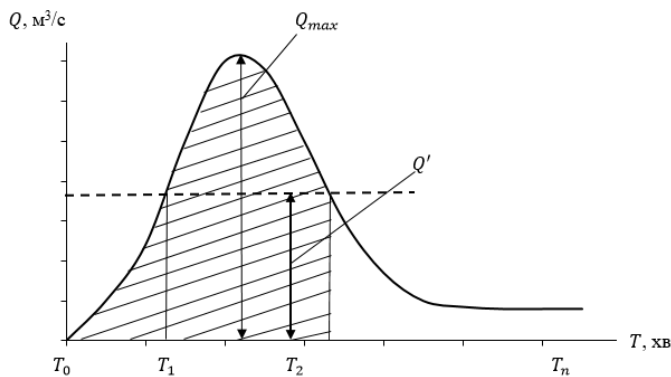


Рис. 4. Крива зменшення пікового стоку води під час дощової події

Метод оцінки зниження загальної кількості забруднюючих речовин конструкцією дощового саду. Позначимо зміну інтенсивності та концентрації забруднюючих речовин зливого стоку в часі через параметри $q(T)$ і $C(T)$, причому концентрація зменшується зі збільшенням часу. Залежно від структури та особливостей конструкції дощового саду, загальне зменшення кількості забруднюючих речовин може бути розглянуто у двох випадках.

1. *Метод оцінки зменшення забруднюючих речовин конструкцією дощового саду під час однієї дощової події.*

Перший випадок. Якщо в конструкції дощового саду передбачено дренажну систему з непроникних і неперфорованих колекторних труб, які зазвичай встановлюються в шарі гравію, це означає, що стік, який надходить у дощовий сад, збирається всередині конструкції. У цьому випадку можна вважати, що забруднюючі речовини видаляються конструкцією дощового саду в повному обсязі, що можна описати як:

$$m = M - U' \cdot C_r, \quad (17)$$

$$\varepsilon = \frac{m}{M} \cdot 100\%, \quad (18)$$

де m – загальна кількість забруднюючих речовин, видалених конструкцією дощового саду, мг; M – загальна кількість забруднюючих речовин, що надходять до конструкції дощового саду, мг; U' – об'єм утриманої дощовим садом води; C_r – середня концентрація забруднюючих речовин у воді однієї дощової події, мг/дм³; ε – загальний коефіцієнт зменшення забруднюючих речовин у стоці.

Середню концентрацію забруднюючих речовин у воді однієї дощової події можна розрахувати, виходячи з рівняння (19):

$$C_r = \frac{M}{U} = \frac{\int_{T_0}^{T_n} c(T) \cdot q(T) dT}{q(T) dT} = \frac{\sum c(T) \cdot q(T) \Delta T}{\sum q(T) \Delta T}, \quad (19)$$

де U – загальний об'єм вихідного дощового стоку, м³; T_0 – час початку утворення стоку, хв; T_n – тривалість стоку, хв; ΔT – час інтервалу вибірки (період часу між послідовними вимірюваннями або відбором проб), хв.

Тоді, враховуючи рівняння (14), загальна кількість забруднюючих речовин, видалених конструкцією дощового саду, буде визначатись:

$$m = \varphi \cdot A_{bassin} \cdot C_r \cdot \int_{T_0}^{T_n} q(T) dT. \quad (20)$$

Другий випадок. Якщо в конструкції дощового саду передбачено водопроникний шар та наявна дренажна система з перфорованих труб у шарі гравію, то можна вважати, що забруднюючі речовини видаляються конструкцією дощового саду частково.

Тоді:

$$M = m - U' \cdot C, \quad (21)$$

$$\varepsilon = \frac{m}{M} \cdot 100\%, \quad (22)$$

де C – середня концентрація забруднюючих речовин у стоці на виході з конструкції дощового саду, мг/дм³.

2. *Метод оцінки річного зменшення забруднюючих речовин конструкцією дощового саду.*

Для першого випадку загальна річна кількість видалених забруднюючих речовин і коефіцієнт зменшення сумарної їх кількості показано у вигляді формул (23) і (24):

$$M' = (a \cdot \varphi \cdot R \cdot A_{bassin} + \sum_{i=1}^b \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin}) \cdot C_1, \quad (23)$$

$$\varepsilon' = \frac{M'}{\sum_{i=1}^n \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin} \cdot C_1} \cdot 100\% = \frac{a \cdot R + \sum_{i=1}^b R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \cdot 100\%, \quad (24)$$

де M' – загальна річна кількість видалених забруднюючих речовин, мг; C_1 – середня концентрація забруднюючих речовин у стоці для n випадків дощових подій, мг/дм³; ε' – коефіцієнт зменшення сумарної кількості забруднюючих речовин.

Для другого випадку загальна річна кількість видалених забруднюючих речовин і коефіцієнт зменшення сумарної їх кількості показано у вигляді формул (25) і (26):

$$M'' = (a \cdot \varphi \cdot R \cdot A_{bassin} + \sum_{i=1}^b \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin}) \cdot (C_1 - C'), \quad (25)$$

$$\varepsilon' = \frac{M''}{\sum_{i=1}^n \varphi \cdot R_i \cdot A_{bassin} \cdot C_1} \cdot 100\% = \frac{(a \cdot R + \sum_{i=1}^b R_i) \cdot (C_1 - C')}{\sum_{i=1}^n R_i \cdot C_1} \cdot 100\%, \quad (26)$$

де C' – середня концентрація забруднюючих речовин у стоці для n випадків дощових подій, мг/дм³.

Висновки

Дощовий сад широко використовується для управління дощовими водами на малих водозбірних площах і має важливе значення у зменшенні швидкості пікових стоків води під час повені, об'єму стічних вод, загального їх забруднення та захисту водних ресурсів. Незважаючи на значну кількість існуючих в науковій літературі моделей, які дозволяють описати гідрологічні параметри дощових садів, важливим аспектом, який залишається недостатньо вивченим, є врахування основних гідрологічних елементів водного балансу. Розроблено числову модель, яка дозволяє розраховувати ефективну площу конструкції дощового саду для однієї дощової події та при умові відсутності переповнення конструкції з уникненням її витікання. Запропоновано методи оцінки трьох основних функцій дощових садів в сфері управління зливовими водами: метод оцінки зменшення об'єму зливого стоку; метод оцінки скорочення річного об'єму стоку; метод оцінки зниження об'єму пікового стоку та метод оцінки зниження загальної кількості забруднюючих речовин конструкцією дощового саду. Запропоновані в рамках роботи числові моделі можуть бути корисним інструментом на етапі планування та реалізації майбутніх інвестицій у дощові сади, які будуть впроваджуватись в міських районах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Coates, R. (2022). Infrastructural events? Flood disaster, narratives and framing under hazardous urbanization. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 74, 102918. 10.1016/j.ijdrr.2022.102918.
2. Chen, W.; Wang, W.; Huang, G.; Wang, Z.; Lai, C.; Yang, Z. (2021). The capacity of grey infrastructure in urban flood management: A comprehensive analysis of grey infrastructure and the green-grey approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 54, 102045. 10.1016/j.ijdrr.2021.102045.

3. Berland, A.; Shiflett, S.A.; Shuster, W.D.; Garmestani, A.S.; Goddard, H.C.; Herrmann, D.L.; Hopton, M.E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, 167–177. 10.1016/j.landurbplan.2017.02.017.
4. Coleman, S.; Hurley, S.; Rizzo, D.; Koliba, C.; Zia, A. (2018). From the household to watershed: A cross-scale analysis of residential intention to adopt green stormwater infrastructure. *Landscape and Urban Planning*, 180, 195–206. 10.1016/j.landurbplan.2018.09.005.
5. Ying, J.; Zhang, X.; Zhang, Y.; Bilan, S. (2022). Green infrastructure: systematic literature review. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 35, 343–366. 10.1080/1331677X.2021.1893202.
6. Gao, M.; Wang, Z.; Yang, H. (2022). Review of Urban Flood Resilience: Insights from Scientometric and Systematic Analysis. *IJERPH*, 19, 8837. 10.3390/ijerph19148837.
7. Green, D.; O'Donnell, E.; Johnson, M.; Slater, L.; Thorne, C.; Zheng, S.; Stirling, R.; Chan, F.K.S.; Li, L.; Boothroyd, R.J. (2021). Green infrastructure: The future of urban flood risk management? *WIREs Water*, 8, e1560. 10.1002/wat2.1560.
8. Bruner, S.G.; Palmer, M.I.; Griffin, K.L.; Naeem, S. (2023). Planting design influences green infrastructure performance: Plant species identity and complementarity in rain gardens. *Ecological Applications*, 33, e2902. 10.1002/eap.2902.
9. Sharma, R.; Malaviya, P. (2021). Management of stormwater pollution using green infrastructure: The role of rain gardens. *WIREs Water*, 8, e1507. 10.1002/wat2.1507.
10. Кравченко, М.В.; Ткаченко, Т.М. (2023). Проблеми удосконалення термінології та сучасної класифікації «зелених» конструкцій для створення українських «зелених» стандартів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, 493, 194–204. 10.15589/znp2023.4(493).26.
11. Alim, M.A.; Rahman, A.; Tao, Z.; Garner, B.; Griffith, R.; Liebman, M. (2022). Green roof as an effective tool for sustainable urban development: An Australian perspective in relation to stormwater and building energy management. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132561. 10.1016/j.jclepro.2022.132561.
12. Burszta-Adamiak, E.; Biniak-Pieróg, M.; Dąbek, P.B.; Sternik, A. (2023). Rain garden hydrological performance – Responses to real rainfall events. *Science of The Total Environment*, 887, 164153. 10.1016/j.scitotenv.2023.164153.
13. Кравченко, М.В.; Ткаченко, Т.М.; Мілейковський, В.О. (2023). Модифікація «зеленої» покрівлі з використанням технічних рішень для зменшення негативного впливу зливових вод в міських умовах. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*, 16–28. 10.32347/2524-0021.2023.43.16-28.
14. Ткаченко, Т.М.; Мілейковський, В.О.; Кравченко, М.В. (2023). Вплив «зелених» покрівель на управління дощовими водами: огляд наукових досліджень та перспективи використання. *Екологічна безпека та природокористування*, 46, 35–53. 10.32347/2411-4049.2023.2.35-53.
15. Osheen; Singh, K.K. (2019). Rain Garden – A Solution to Urban Flooding: A Review. In *Sustainable Engineering*; Agnihotri, A.K., Reddy, K., Bansal, A., Eds.; Lecture Notes in Civil Engineering; Springer Singapore: Singapore, Vol. 30, pp. 27–35. ISBN 9789811367168. 10.1007/978-981-13-6717-5_4.
16. Shafique, M. (2016). A review of the bioretention system for sustainable storm water management in urban areas. *Materials and Geoenvironment*, 63, 227–236. 10.1515/rmzmag-2016-0020.
17. Shuster, W.; Darner, R.; Schiffman, L.; Herrmann, D. (2017). Factors Contributing to the Hydrologic Effectiveness of a Rain Garden Network (Cincinnati OH USA). *Infrastructures*, 2, 11. 10.3390/infrastructures2030011.
18. Morash, J.; Wright, A.; LeBleu, C.; Meder, A.; Kessler, R.; Brantley, E.; Howe, J. (2019). Increasing Sustainability of Residential Areas Using Rain Gardens to Improve Pollutant Capture, Biodiversity and Ecosystem Resilience. *Sustainability*, 11, 3269. 10.3390/su11123269.

19. DeBusk, K.M.; Wynn, T.M. (2011). Storm-Water Bioretention for Runoff Quality and Quantity Mitigation. *J. Environ. Eng.*, 137, 800–808. 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000388.
20. Rezaei, A.R.; Ismail, Z.; Niksokhan, M.H.; Dayarian, M.A.; Ramli, A.H.; Shirazi, S.M. (2019). A Quantity-Quality Model to Assess the Effects of Source Control Stormwater Management on Hydrology and Water Quality at the Catchment Scale. *Water*, 11, 1415. 10.3390/w11071415.
21. Brown, R.A.; Hunt, W.F. (2011). Underdrain Configuration to Enhance Bioretention Exfiltration to Reduce Pollutant Loads. *J. Environ. Eng.*, 137, 1082–1091. 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000437.
22. Shafique, M.; Kim, R. (2017). Retrofitting the Low Impact Development Practices into Developed Urban areas Including Barriers and Potential Solution. *Open Geosciences*, 9. 10.1515/geo-2017-0020.
23. Zhang, L.; Ye, Z.; Shibata, S. (2020). Assessment of Rain Garden Effects for the Management of Urban Storm Runoff in Japan. *Sustainability*, 12, 9982. 10.3390/su12239982.
24. Wanitchayapaisit, C.; Suppakittpaisarn, P.; Charoenlerthanakit, N.; Surinseng, V.; Yaipimol, E.; Rinchumphu, D. (2022). Rain garden design for stormwater management in Chiang Mai, Thailand: A Research-through-Design Study. *NJEDP*, 21, 222. 10.54028/NJ202221222.
25. Liu, J.; Sample, D.; Bell, C.; Guan, Y. (2014). Review and Research Needs of Bioretention Used for the Treatment of Urban Stormwater. *Water*, 6, 1069–1099. 10.3390/w6041069.
26. Wang, X.; Zhang, J.; Babovic, V.; Gin, K.Y.H. (2019). A comprehensive integrated catchment-scale monitoring and modelling approach for facilitating management of water quality. *Environmental Modelling & Software*, 120, 104489. 10.1016/j.envsoft.2019.07.014.
27. Zhang, L.; Lu, Q.; Ding, Y.; Peng, P.; Yao, Y. (2018). Design and Performance Simulation of Road Bioretention Media for Sponge Cities. *J. Perform. Constr. Facil.*, 32, 04018061. 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001209.
28. Li, J.Q.; Xiang, L.L.; Che, W.; Ge, R.L. (2008). Design and Hydrologic Estimation Method of Multi-Purpose Rain Garden: Beijing Case Study. In *Proceedings of the Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection*; American Society of Civil Engineers: Seattle, Washington, United States, pp. 1–10. 10.1061/41009(333)67.
29. *Stormwater Management for Smart Growth*; Springer-Verlag: New York, 2005; ISBN 978-0-387-26048-8. 10.1007/0-387-27593-2.
30. TP10 Stormwater management devices design guideline manual 2003.pdf.
31. Available online: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/> (accessed on March 17, 2024).

Стаття надійшла до редакції 23.01.2024 і прийнята до друку після рецензування 03.05.2024

REFERENCES

1. Coates, R. (2022). Infrastructural events? Flood disaster, narratives and framing under hazardous urbanisation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 74, 102918. 10.1016/j.ijdr.2022.102918.
2. Chen, W.; Wang, W.; Huang, G.; Wang, Z.; Lai, C.; Yang, Z. (2021). The capacity of grey infrastructure in urban flood management: A comprehensive analysis of grey infrastructure and the green-grey approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 54, 102045. 10.1016/j.ijdr.2021.102045.
3. Berland, A.; Shiflett, S.A.; Shuster, W.D.; Garmestani, A.S.; Goddard, H.C.; Herrmann, D.L.; Hopton, M.E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, 167–177. 10.1016/j.landurbplan.2017.02.017.

4. Coleman, S.; Hurley, S.; Rizzo, D.; Koliba, C.; Zia, A. (2018). From the household to watershed: A cross-scale analysis of residential intention to adopt green stormwater infrastructure. *Landscape and Urban Planning*, 180, 195–206. 10.1016/j.landurbplan.2018.09.005.
5. Ying, J.; Zhang, X.; Zhang, Y.; Bilan, S. (2022). Green infrastructure: systematic literature review. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*, 35, 343–366. 10.1080/1331677X.2021.1893202.
6. Gao, M.; Wang, Z.; Yang, H. (2022). Review of Urban Flood Resilience: Insights from Scientometric and Systematic Analysis. *IJERPH*, 19, 8837. 10.3390/ijerph19148837.
7. Green, D.; O'Donnell, E.; Johnson, M.; Slater, L.; Thorne, C.; Zheng, S.; Stirling, R.; Chan, F.K.S.; Li, L.; Boothroyd, R.J. (2021). Green infrastructure: The future of urban flood risk management? *WIREs Water*, 8, e1560. 10.1002/wat2.1560.
8. Bruner, S.G.; Palmer, M.I.; Griffin, K.L.; Naeem, S. (2023). Planting design influences green infrastructure performance: Plant species identity and complementarity in rain gardens. *Ecological Applications*, 33, e2902. 10.1002/eap.2902.
9. Sharma, R.; Malaviya, P. (2021). Management of stormwater pollution using green infrastructure: The role of rain gardens. *WIREs Water*, 8, e1507. 10.1002/wat2.1507.
10. Kravchenko, M.V.; Tkachenko, T.M. (2023). Problems of improving the terminology and modern classification of “green” constructions for the creation of Ukrainian “green” standards. *Collection of Scientific Publications NUS*, 493, 194–204. 10.15589/znz2023.4(493).26 [in Ukrainian].
11. Alim, M.A.; Rahman, A.; Tao, Z.; Garner, B.; Griffith, R.; Liebman, M. (2022). Green roof as an effective tool for sustainable urban development: An Australian perspective in relation to stormwater and building energy management. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132561. 10.1016/j.jclepro.2022.132561.
12. Burszta-Adamiak, E.; Biniak-Pieróg, M.; Dąbek, P.B.; Sternik, A. (2023). Rain garden hydrological performance – Responses to real rainfall events. *Science of The Total Environment*, 887, 164153. 10.1016/j.scitotenv.2023.164153.
13. Kravchenko, M.; Tkachenko, T.; Mileikovskiy, V. (2023). Modification of the “green” roof using technical solutions to reduce the negative impact of stormwater in urban conditions. *PWSH*, 16–28. 10.32347/2524-0021.2023.43.16-28 [in Ukrainian].
14. Tkachenko, T.M.; Mileikovskiy, V.O.; Kravchenko, M.V. (2023). Impact of “green” roofs on rainwater management: review of scientific research and perspectives of use. *ESANR*, 46, 35–53. 10.32347/2411-4049.2023.2.35-53 [in Ukrainian].
15. Osheen; Singh, K.K. (2019). Rain Garden – A Solution to Urban Flooding: A Review. In *Sustainable Engineering*; Agnihotri, A.K., Reddy, K., Bansal, A., Eds.; Lecture Notes in Civil Engineering; Springer Singapore: Singapore, Vol. 30, pp. 27–35. ISBN 9789811367168. 10.1007/978-981-13-6717-5_4.
16. Shafique, M. (2016). A review of the bioretention system for sustainable storm water management in urban areas. *Materials and Geoenvironment*, 63, 227–236. 10.1515/rmzmag-2016-0020.
17. Shuster, W.; Darner, R.; Schiffman, L.; Herrmann, D. (2017). Factors Contributing to the Hydrologic Effectiveness of a Rain Garden Network (Cincinnati OH USA). *Infrastructures*, 2, 11. 10.3390/infrastructures2030011.
18. Morash, J.; Wright, A.; LeBleu, C.; Meder, A.; Kessler, R.; Brantley, E.; Howe, J. (2019). Increasing Sustainability of Residential Areas Using Rain Gardens to Improve Pollutant Capture, Biodiversity and Ecosystem Resilience. *Sustainability*, 11, 3269. 10.3390/su11123269.
19. DeBusk, K.M.; Wynn, T.M. (2011). Storm-Water Bioretention for Runoff Quality and Quantity Mitigation. *J. Environ. Eng.*, 137, 800–808. 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000388.

20. Rezaei, A.R.; Ismail, Z.; Niksokhan, M.H.; Dayarian, M.A.; Ramli, A.H.; Shirazi, S.M. (2019). A Quantity-Quality Model to Assess the Effects of Source Control Stormwater Management on Hydrology and Water Quality at the Catchment Scale. *Water*, *11*, 1415. 10.3390/w11071415.
21. Brown, R.A.; Hunt, W.F. (2011). Underdrain Configuration to Enhance Bioretention Exfiltration to Reduce Pollutant Loads. *J. Environ. Eng.*, *137*, 1082–1091. 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000437.
22. Shafique, M.; Kim, R. (2017). Retrofitting the Low Impact Development Practices into Developed Urban areas Including Barriers and Potential Solution. *Open Geosciences*, *9*. 10.1515/geo-2017-0020.
23. Zhang, L.; Ye, Z.; Shibata, S. (2020). Assessment of Rain Garden Effects for the Management of Urban Storm Runoff in Japan. *Sustainability*, *12*, 9982. 10.3390/su12239982.
24. Wanitchayapaisit, C.; Suppakittpaisarn, P.; Charoenlerthanakit, N.; Surinseng, V.; Yaipimol, E.; Rinchumphu, D. (2022). Rain garden design for stormwater management in Chiang Mai, Thailand: A Research-through-Design Study. *NJEDP*, *21*, 222. 10.54028/NJ202221222.
25. Liu, J.; Sample, D.; Bell, C.; Guan, Y. (2014). Review and Research Needs of Bioretention Used for the Treatment of Urban Stormwater. *Water*, *6*, 1069–1099. 10.3390/w6041069.
26. Wang, X.; Zhang, J.; Babovic, V.; Gin, K.Y.H. (2019). A comprehensive integrated catchment-scale monitoring and modelling approach for facilitating management of water quality. *Environmental Modelling & Software*, *120*, 104489. 10.1016/j.envsoft.2019.07.014.
27. Zhang, L.; Lu, Q.; Ding, Y.; Peng, P.; Yao, Y. (2018). Design and Performance Simulation of Road Bioretention Media for Sponge Cities. *J. Perform. Constr. Facil.*, *32*, 04018061. 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001209.
28. Li, J.Q.; Xiang, L.L.; Che, W.; Ge, R.L. (2008). Design and Hydrologic Estimation Method of Multi-Purpose Rain Garden: Beijing Case Study. In Proceedings of the Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection; American Society of Civil Engineers: Seattle, Washington, United States, pp. 1–10. 10.1061/41009(333)67.
29. *Stormwater Management for Smart Growth*; Springer-Verlag: New York, 2005; ISBN 978-0-387-26048-8. 10.1007/0-387-27593-2.
30. TP10 Stormwater management devices design guideline manual 2003.pdf.
31. Available online: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/> (accessed on March 17, 2024).

The article was received 23.01.2024 and was accepted after revision 03.05.2024

Кравченко Марина Василівна

к.т.н., доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** marina-diek@ukr.net

Ткаченко Тетяна Миколаївна

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

УДК 551.583

Ilia Sviatohorov, Post-Graduate of Department of Labour and Environment Protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF GEOTECHNICAL STRUCTURES IN «GREEN CONSTRUCTION»

Abstract. *Green buildings are structures that are located, designed, built, renovated and operated in accordance with the main principles of energy efficiency, and that they will have a positive impact on the environment, economy and social sphere during their entire life cycle. The need to save energy and mitigate environmental problems contributed to the emergence of a wave of green innovations in construction, which continues to this day. The main goal of the concept of sustainable development in geotechnical "green construction" is to: provide it with economic competitiveness and sufficient usefulness; at the same time, reduce energy and material consumption; re-duce the area of land plots allocated for construction; to minimize risks of harm to health and life of people in case of accidents and undesirable events during geotechnical construction. The reconstruction of Postal Square is one of the largest infrastructure projects in Kyiv in recent years. Large traffic flows in the "north-south" direction pass through the square, and the absence of a modern transport hub in this area complicates car traffic. The reconstruction project provided for the construction of a two-lane road tunnel, an overhead transport overpass (the first phase of construction), as well as a two-story underground shopping complex with a total area of about 8,000 m² (the second phase of construction) and complex improvement of the territory with the arrangement park and fountain. The construction was carried out taking into account the high responsibility of the construction and the complexity of the engineering and geological conditions of the construction site. The requirements of geotechnical "green construction" in the conditions of dense urban development based on a systemic approach were met. At the same time, the following were resolved: the absence of shear deformations of the surrounding slopes during the construction of the pit, construction and operation of the structure; integrity of surrounding buildings; ensuring reliable operation of the metro line; strength and reliability of structures under construction; preservation of the original hydrogeological regime of the territory; preservation of under-ground monuments of history and architecture, other issues.*

Key words: *green construction, geotechnics, retaining wall, numerical modeling.*

І.О. Святогорів

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

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОТЕХНІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ В «ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ»

Анотація. *«Зелені» будівлі – це споруди, які розташовані, спроектовані, побудовані, відремонтовані і експлуатуються відповідно до основних принципів енергоефективності, а також чинять позитивний вплив на навколишнє середовище, економіку і соціальну сферу протягом всього їх життєвого циклу. Необхідність економії енергії і пом'якшення екологічних*

проблем сприяла появі хвилі «зелених» інновацій в будівництві, яка триває і донині. Основна мета концепції сталого розвитку в геотехнічному «зеленому будівництві» полягає в тому, щоб: надати йому економічну конкурентоспроможність та достатню корисність; в той же час знизити енерго- і матеріаломісткість; зменшити площу земельних ділянок, що відводиться під будівництво; мінімізувати ризики шкоди для здоров'я і життя людей в разі аварій і небажаних подій під час геотехнічного будівництва. Реконструкція Поштової площі є одним з найбільших інфраструктурних проєктів в Києві за останні роки. Через площу проходять великі транспортні потоки в напрямку «північ-південь», і відсутність на цій території сучасного транспортного вузла ускладнює автомобільний рух. Проєкт реконструкції передбачав будівництво автомобільного тунелю з рухом в двох напрямках по дві смуги, надземної транспортної естакади (перша черга будівництва), а також двоповерхового підземного торгового комплексу загальною площею близько 8000 м² (друга черга будівництва) та комплексний благоустрій території з влаштуванням скверу та фонтану. Будівництво виконувалось з урахуванням високої відповідальності споруди та складності інженерно-геологічних умов будівельного майданчика. Були дотримані вимоги геотехнічного «зеленого будівництва» в умовах ущільненої міської забудови на основі системного підходу. Одночасно вирішувались: відсутність протягом влаштування котловану, будівництва та експлуатації споруди зсувних деформацій оточуючих схилів; цілісність навколишніх будівель; забезпечення надійної експлуатації лінії метрополітену; міцність і надійність споруд, що будуються; збереження первісного гідрогеологічного режиму території; збереження підземних пам'яток історії та архітектури.

Ключові слова: «зелене будівництво», геотехніка, протизсувні споруди, чисельне моделювання.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.36-47>

Вступ

Поштова площа забудована безліччю споруд, в числі яких Поштовий будинок (пам'ятка історії XIX століття), церква Різдва Христового, річковий вокзал, група адміністративних будівель, споруди початку і середини XX століття (рис. 1).



Рис. 1. Архітектурний макет Поштової площі після реконструкції

Існуюча забудова і лінія метрополітену обумовлюють підвищені вимоги до проєктних рішень і виконання робіт по їх збереженню. Проєкт реконструкції передбачав будівництво автомобільного тунелю з рухом в двох напрямках по дві смуги, надземної транспортної естакади (перша черга будівництва), а також двоповерхового підземного торгового комплексу загальною площею близько 8000 м² (друга черга будівництва) та комплексний благоустрій території з влаштуванням скверу та фонтану. Будівництво виконувалось з урахуванням високої відповідальності споруди для м. Києва та складності інженерно-геологічних умов будівельного майданчика. Були дотримані вимоги геотехнічного «зеленого будівництва» в умовах ущільненої міської забудови. Як зазначає у своїх роботах професор Ванічек, геотехнічні конструкції являють собою дуже хороший приклад застосування принципів «зеленого будівництва» [18, 19]:

I. Збереження земельних ділянок (утідь) при проєктуванні, що розташовані поблизу крутих схилів насипів або котлованів. В таких випадках, зазвичай, використовуються геосинтетичні матеріали для зміцнення ґрунтових стінок схилів (котлованів).

II. Економія природних наповнювачів протизсувних споруд за рахунок використання альтернативних (природних) матеріалів. При використанні матеріалів у великих кількостях необхідно заздалегідь перевірити їх фізико-механічні властивості, а також їх вплив на навколишнє середовище, щоб запобігти нештатній поведінці (реагуванню) (наприклад, при збільшенні шлаку в одиниці об'єму матеріала-наповнювача) або забрудненню підстилаючого ґрунту продуктами відходів вилуговування.

III. Економія електроенергії протягом всього передбачуваного терміну експлуатації геотехнічних споруд, яка може бути пов'язана з безліччю аспектів. Наприклад, якщо застосувати концепцію сталого розвитку до більш крутих зсувонебезпечних схилів, можна не тільки зменшити розмір ділянки під майбутнє будівництво, а й знизити споживання енергії, необхідної для виїмки ґрунту та на його переміщення при будівництві.

IV. Вибір найкращої технології і контроль ущільнення ґрунту в геотехніці є також важливим аспектом з точки зору економії електроенергії. Сюди ж можна додати використання геотермальної енергії і, нарешті, економію може дати використання нових інтелектуальних геотехнічних конструкцій, при зведенні яких споживання енергії буде менше, ніж в класичних геотехнічних конструкціях.

V. Підпірні протизсувні стіни з укріпленого ґрунту в порівнянні з класичними бетонними гравітаційними підпірними протизсувними стінами.

VI. Максимальне збереження культурної спадщини в підземному просторі.

В процесі робіт на основі системного підходу вирішувались: 1) цілісність навколишніх будівель; 2) забезпечення надійної експлуатації лінії метрополітену; 3) міцність і надійність споруд, що будуються; 4) збереження гідрогеологічного режиму території; 5) збереження підземних пам'яток історії та архітектури.

Інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови території

За даними інженерно-геологічних вишукувань в геоморфологічному відношенні майданчик реконструкції Поштової площі розташований в районі примикання правобережної високої заплави Дніпра до крутого корінного схилу Київського плато. Рельєф, сформований в результаті схилових процесів і техногенної діяльності людини, характеризується абсолютними відмітками денної поверхні 97,5 ... 112,3 м, із загальним рівномірним зниженням в бік долини Дніпра. В геологічній будові майданчика, на розвіданій глибині до 40 м, беруть участь відкладення харківської, київської і бучакської світ, повсюдно перекриті верхньочетвертинними делювіальними відкладеннями і насипними ґрунтами.

За результатами бурових робіт і лабораторних досліджень ґрунтів в межах розвіданої глибини виділено 7 інженерно-геологічних елементів:

1) насипний ґрунт – глина, іноді суглинок з гніздами і прошарками піску і супіску, з вмістом будівельного сміття до 20%, на окремих ділянках – до 35%, твердої і напівтвердої консистенції, потужність шару від 3,2 до 5,5 м;

2) глина, в основному, легка пілувата, бура, буро-сіра, сизувато-сіра, темно-сіра, твердої, напівтвердої консистенції, потужність шару від 1,6 до 5,5 м;

3) суглинок, в основному, важкий пілуватий, зеленувато-сірий, сизувато-сірий, темно-сірий, з прошарками і лінзами піску або супіску, напівтвердої консистенції, потужність шару від 1,6 до 5,5 м;

4) пісок пілуватий, іноді невеликий, сірий з зеленуватим відтінком, темно-сірий, середньої щільності, насичений водою, залягає у вигляді прошарків і лінз незначною потужністю в середньому 0,9 м;

5) пісок пілуватий, місцями невеликий, жовтувато-сірий з зеленуватим відтінком з великою кількістю прошарків і лінз супіску та суглинку, середньої щільності, насичений водою, потужність розкритого шару від 3,3 до 10,2 м;

6) глина "Київський мергель" легка пілувата, іноді суглинок важкий пілуватий, світла зеленувато-сіра, твердої і напівтвердої консистенції, потужність витримана, в середньому 10,1 м;

7) пісок дрібний, іноді пілуватий, темно-зеленувато-сірий глауконітовий, гідрослюдястий, з рідкісними прошарками супіску, середньої щільності, насичений водою, потужність становить в середньому 13,3 м.

Інженерно-геологічні умови майданчика будівництва відносяться до III категорії (складної) в зв'язку з можливістю розвитку зсувних процесів. Гідрогеологічні умови досліджуваного майданчика характеризуються наявністю повсюдно поширеного водоносного комплексу, який складається з водоносного горизонту, приуроченого до четвертинних алювіальних відкладів, ґрунтів бучакської світи і тимчасового водоносного шару типу «верховодка».

Перший водоносний горизонт знаходиться на абсолютних позначках 99.8 ... 108.1 м. Амплітуда сезонних коливань рівня підземних вод становить 1.0 м.

Другий водоносний горизонт приурочений до бучакських пісків на абсолютних позначках 83,1 ... 83,4 м. Води напірні, п'єзометричний рівень зафіксований на абсолютних позначках 90,6 ... 90,7 м, величина напору становить 7.3 ... 7.5 м.

Об'єкти вірогідного впливу котловану будівництва на навколишню забудову

При проектуванні підземної споруди враховується взаємний вплив даного об'єкту і споруд (будівель) навколишньої забудови в межах Поштової площі, до числа яких можна віднести споруди транспортної розв'язки і перегінних тунелів метрополітену, а також Поштовий будинок, Церкву Різдва Христового і будівлю «Київпастрансу» (рис. 2).

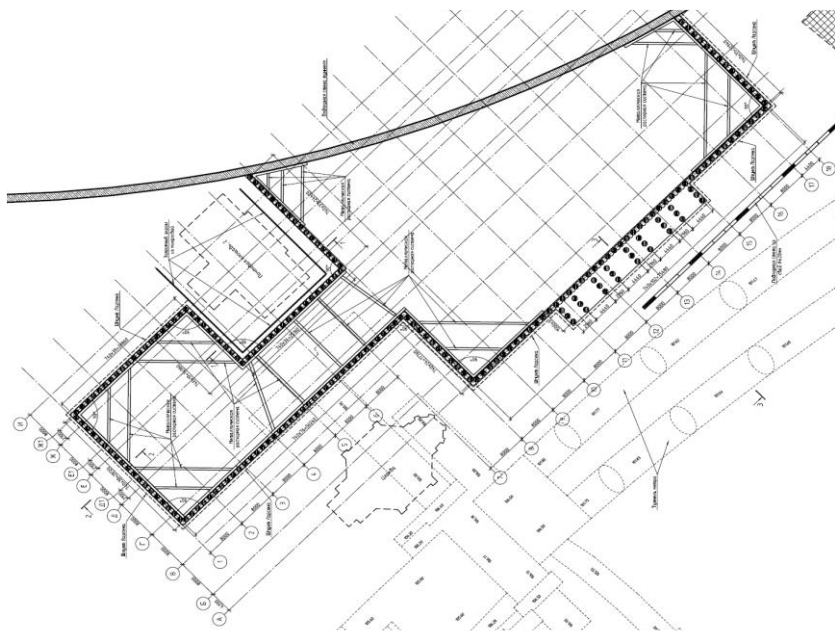


Рис. 2. План розташування конструкцій огороження котловану і ближніх будівель: церква Різдва Христового, Поштовий будинок, будівля «Київпастрансу»

Найближче до об'єкта будівництва розташований Поштовий будинок, відстань від його торця до межі огороження котловану під проектований об'єкт становить 3.2 м; від двох інших боків будинку до межі огороження котловану – 5.6 і 9.0 м. Поштовий будинок – одноповерхова цегляна будівля з підвалом.

У плані будівля прямокутна з тильним виступом, має розміри близько 23.60x17.60 м. До навколишньої забудови проєктованого об'єкта на Поштовій площі належить також будівля Церкви Різдва Христового, що знаходиться на відстані 9.0 м від торця і 11.0 м від головного фасаду до котловану. Як в плані, так і по висоті будівля має складну форму з розмірами в осях 29.52x19.04 м, при висоті основного приміщення храму 14.04 м.

На відстані 15 м від майданчика будівництва знаходиться будівля «Київпастрансу» прямокутної форми в плані з максимальними розмірами 65.0x17.0 м і висотою 15.0 м. Також поблизу майданчика будівництва, на відстані близько 16.5 і 28.0 м від огороження котловану, розташовані два перегінних тунелі метрополітену. Абсолютна відмітка низу конструкцій тунелів становить 95.770 м.

Конструкція огороження котловану

Огородження котловану під будівництво багатофункціонального об'єкта на ділянці по осі А1 виконано з паль діаметром 1020 мм з бетону класу С25/0 для армованих паль і бетону класу С20/25 для неармованих паль. Крок армованих паль 1480 мм. Голови паль об'єднані балковим ростверком. Абсолютна відмітка голови паль – 104.400 м, п'яти паль – 78.500 м. Відмітка рівня дна котловану 96.000 м.

По довжині стіни огороження котловану (довжина ділянки стіни по осі А1 становить 74.7 м) влаштовуються з зовнішнього боку котловану 9 контрфорсів по три палі в кожному з них. Контрфорси об'єднані між собою і з палями основного ряду плитою ростверку товщиною 400 мм. Огородження котловану на інших ділянках стін котловану, в тому числі і навколо Поштового будинку, виконані з паль діаметром 880 мм. Армовані палі виконуються з бетону класу С25/30, неармовані палі – з бетону класу С20/25. Крок армованих паль – 1480 мм.

Голови паль об'єднані балковим ростверком перетином 980х600 мм. З метою виключення механічної суфозії частинок ґрунту внаслідок виробництва буріння свердловин під палі навколо будівлі Поштового будинку влаштований захисний екран з мікропаль, при цьому глибина занурення цих паль доходить до шару піску на позначці 86.000 м.

В системі огороження котловану присутні конструктивні елементи – розпірні конструкції, які беруть участь в сприйнятті і передачі тиску ґрунту на інші конструкції огороження котловану. Розпірні конструкції виконують тимчасові функції. В процесі екскавації ґрунту з котловану і в міру зведення конструкцій каркасу і перекриттів підземної споруди розпірні елементи були демонтовані. Схема огороження котловану показана на рис. 2.

Математичне моделювання НДС котловану

Питання математичного та експериментального моделювання механіки ґрунтів, а особливо зсувних порушень, розглядалися в багатьох роботах вітчизняних і зарубіжних дослідників [1–26]. З їх аналізу випливає перспективність застосування сучасних пакетів прикладних програм для моделювання напружено-деформованого стану зсувонебезпечних схилів та котлованів. Виходячи з цього, нами виконаний розрахунок споруди для стадії будівництва огороження котловану як просторової системи із залученням програмного комплексу «LIRA-WINDOWS». Просторова розрахункова модель для розрахунку споруди наведена на рис. 3.

У таблиці 1 наведені величини горизонтальних переміщень вузлів розрахункової моделі для створу А, в якому отримані найбільші величини переміщень на розглянутих рівнях заглиблення паль у ґрунті. На рис. 4 показаний характер деформування елементів розрахункової моделі огороження котловану.

Так як горизонтальні переміщення не перевищують граничних значень згідно із сучасними українськими будівельними нормами, зроблено висновок про те, що облаштування паль і огороження котловану до проєктної позначки 96,000 м не вплине на будівлю Церкви Різдва Христового (Поштова площа, 4) і адміністративну будівлю «Київпастрансу» (вул. Набережне шосе, 2).

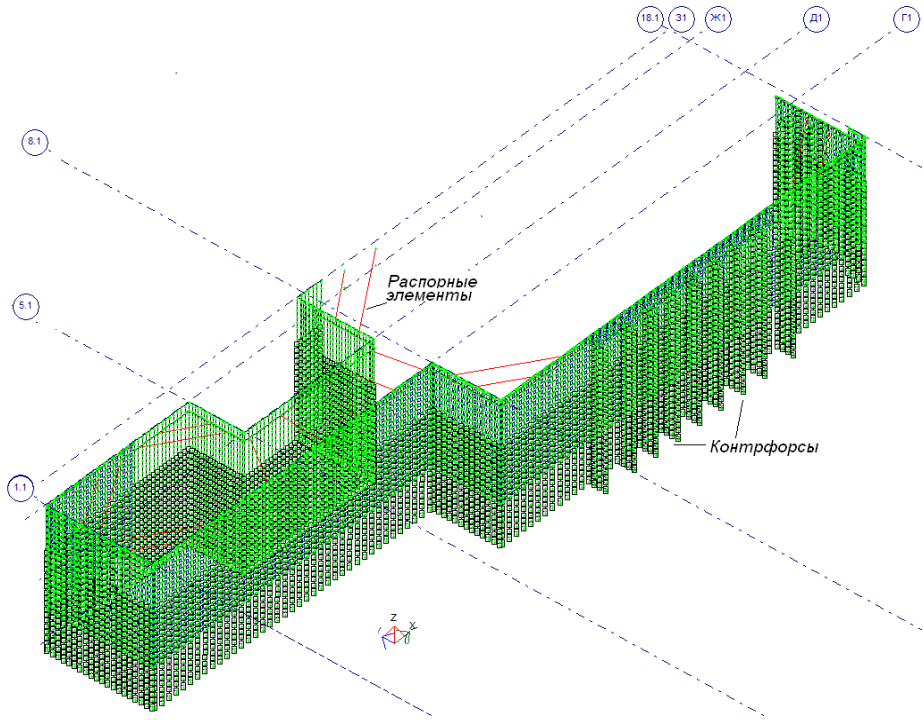


Рис. 3. Розрахункова модель огородження котловану з зовнішніми контрфорсами і розпірними конструкціями. Загальний вигляд

Таблиця 1. Величини горизонтальних переміщень (мм) вузлів розрахункової моделі для створу А

Найменування створу	Геодезичні позначки розрахункового рівня по глибині ґрунтового масиву				
	103.0	101.0	99.0	97.0	95.0
Горизонтальні переміщення (мм) вузлів розрахункової моделі для створу А	57.9	53.8	47.9	40	31.3

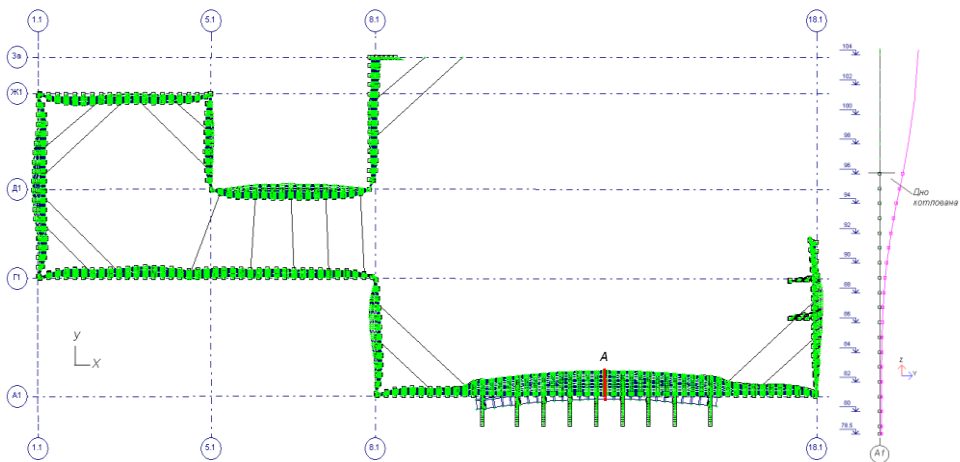


Рис. 4. Деформована схема огородження котловану

Величини додаткових осідань основи фундаментів будівлі Поштового будинку (Поштова площа, 2) внаслідок влаштування конструкцій огороження котловану і розробки його до абсолютної позначки 96,000 м складають приблизно 3,8 мм, що не перевищує допустимі 20 мм.

Унікальні артефакти

Ще в 2013 р. планувалося звести підземний торговельно-розважальний об'єкт з паркінгом на 100–150 машино-місць. Згідно з українським законодавством, перед початком будівництва потрібно провести розкопки. У 2015 р. під час планових робіт на Поштовій площі археологи виявили унікальні артефакти – добре збереглися зруб та частокіл, які, на думку вчених, належать до часів Київської Русі XI–XIII століття.

Знайдені артефакти свідчать про наявність під товщею ґрунту старовинних вулиць і будівель стародавнього Києва, що відносяться до часів Київської Русі XI–XIII століття (рис. 5).

Новина викликала суспільний резонанс. Кияни, історики і просто романтики вимагали зупинити будівельні роботи на Поштовій площі і продовжити розкопки. Мер Києва Віталій Кличко погодився тимчасово відмовитися від будівництва ТРЦ – археологи отримали зелене світло.

Команда фахівців знайшла культурні верстви XV–XVI, XVII–XVIII і навіть XI–XIII століть. Земляні пласти зберегли до наших днів прикраси, кераміку, пляшки, людські кістки і рештки тварин. При цьому "археологічне Ельдорадо" на Поштовій площі зберігає в собі ще багато цінних знахідок і таємниць.



Рис. 5. Ділянка прибережного міського кварталу середньовічного Києва (XI–XIX ст.) на Поштовій площі

Кабінет Міністрів України схвалив зміну категорії пам'ятки "Ділянка прибережного міського кварталу Середньовічного Києва" на Поштовій площі в Києві на категорію національного значення, а також присвоїв їй охоронний номер 260094. Відповідне рішення прийнято на засіданні Уряду 22 травня 2019 р. Архітектурна знахідка розташовується в історичному центрі міста Києва, під сучасною Поштовою площею, яка обмежується береговою лінією Дніпра, між проїзною частиною Володимирського узвозу та вулиці Боричів узвіз.

Межі об'єкта з південно-східного боку поки не виявлені. Глибина залягання починається з 2,5–8 метрів. Щоб зберегти археологічні знахідки XI століття від руйнування, археологи засипали їх землею. У 2019 р. був розроблений проєкт, згідно з яким на музей відводиться 110 кв. м. Але археологи вимагають під музей більшої площі – як мінімум половини поверху торгового центру. Вони стверджують, що цього дуже мало (110 кв. м). Це лише одна десята необхідної площі. Для цього об'єкта необхідно хоча б 1 тис. кв. м (всього площа розкопок становить близько 2 тис. кв. м). Така площа необхідна для створення музею абсолютно нового типу [15], приклад якого наведено на рис. 6.



Рис. 6. Sevilla Metropol Parasol Antiquarium I [15]

Його відкрили на місці розкопок у м. Севілья, будували сім років, вартість близько 100 млн євро. Це – Sevilla Metropol Parasol Antiquarium I [15].

Висновки

1. «Зелені стандарти» будівництва – один з найперспективніших напрямків розвитку не тільки будівельного комплексу, а й соціального середовища суспільства. «Зелене будівництво» набуло широкого поширення в останнє десятиліття в США (LEED), у Великобританії (BREEAM), в Німеччині (NDBG) і ще більш ніж в 40 країнах (Австралія, Канада, Індія та ін.). Вже понад 100 тис. будівель в світі сертифіковано по «зелених стандартах». «Зелені стандарти» в світовій практиці розвиваються як рейтингові системи добровільного застосування.

2. Національні рейтингові системи «зеленого будівництва» вибудовані під свої нормативні бази в галузі будівництва, енергозбереження, екології та враховують свої національні традиції, ресурсні, енергетичні та економічні пріоритети. Адаптація «зелених стандартів» провідних країн в інших державах базується на прийнятті за основу нормативно-методичної бази країн-лідерів зеленого руху (наприклад, LEED – в Канаді та ін.). Однак, до теперішнього часу спроб гармонізації національних моделей-стандартів «зеленого будівництва» країн-лідерів в даній галузі (США – LEED, Великобританії – BREEAM, Німеччини – DGNB) не відзначається.

3. Україна активно долучається до міжнародних конвенцій, які зменшують забруднення навколишнього середовища, і прагне поліпшити національні стандарти відповідно до міжнародних вимог. Вже є приклади сертифікованого за стандартом BREEAM «зеленого будівництва» житлових комплексів в Києві. Розвиток «зеленого будівництва» буде важливою галуззю в Україні, і всебічні дослідження щодо «зеленого будівництва» можуть сприяти подальшому її прогресу.

4. Основна мета концепції сталого розвитку в геотехнічному «зеленому будівництві» полягає в тому, щоб:

- надати йому економічну конкурентоспроможність та достатню корисність;
- в той же час знизити енерго- і матеріаломісткість;
- зменшити площу земельних ділянок, що відводиться під будівництво;
- мінімізувати ризики шкоди для здоров'я і життя людей в разі аварій і небажаних подій під час геотехнічного будівництва.

5. На основі математичного моделювання (розрахунків) проєктованого комплексу і ґрунтових масивів майданчика забудови обґрунтовані і розроблені проєктні рішення нових споруд з урахуванням заходів щодо забезпечення збереженості метрополітену, існуючих будівель і регулювання підземних водних потоків на стадіях будівництва і експлуатації. Розрахунками перевірена стійкість схилу при його підрізці котлованом новобудови. Таким чином, завдяки проведеному комплексу геотехнічних розрахунків проєктованого комплексу спільно з ґрунтовими масивами майданчика забудови розроблені проєктні рішення конструкцій і методи ведення будівництва нових споруд з урахуванням вимог «зеленого будівництва», щільної міської забудови, наявності тунелів метрополітену, існуючих будівель навколишньої забудови і підземних водних потоків на стадіях будівництва і експлуатації.

6. Для будівництва нових і захисту існуючих споруд використані передові методи; огороження котловану виконуються палями з використанням захисних екранів, палями малого діаметру і бентонітовими розчинами; стабілізація рівня підземних вод досягається тимчасовим вертикальним дренажем з механічним відведенням і постійним пластовим дренажем; для забезпечення стійкості і мінімальних деформацій огороження котловану при екскавації ґрунту використовуються розпірні конструкції.

7. Моніторинг деформацій тунелів метрополітену здійснюється з використанням інклінометрів, спостереження за рівнем підземних вод виконується за допомогою п'єзосвердловин, спостереження за оточуючими будівництво спорудами виконується інструментальними геодезичними методами. Моніторинг деформацій тунелів метрополітену, будівель навколишньої забудови і моніторинг рівня підземних вод в процесі будівництва показав величини, які знаходяться в межах, допустимих будівельними нормами України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Voloshkina, E., Efimenko, V., Zhukova, O., Chernyshev, D., Korduba, I., & Shovkivska, V. (2021). Visual Modeling of the Landslide Slopes Stress-Strain State for the Computer-Aided Design of Retaining Wall Structures. In *IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, 2021. 10.1109/CADSM52681.2021.9385211
2. Kaliukh, I., Voloshkina, O., Efimenko, V., Sipakov, R., Zhukova, O., & Kaliukh, T. (2022). Modern Technologies of Internet of Things in the Restrained Urban Development for Complicated Ground Conditions. In *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2022. (pp. 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580086>
3. Kaliukh, I., & Berchun, Y. (2020). Four-Mode Model of Dynamics of Distributed Systems. *J. of Automation and Information Sciences*, 52 (2), 1–12.
4. 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
5. 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>
6. 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>
8. Capparelli, G., Picarelli, L., & Versace, P. (2018). TXT-tool 4.039-4.1 landslide investigations and risk mitigation: The Sarno, Italy, case (Book Chapter). In book: Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools, pp. 771–784. https://10.1007/978-3-319-57777-7_50
9. Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular.
10. Intrieri, E., Gigli, G., Gracch, T., Nocentini, M., Lombardi, L., Mugnai, F, Frodella, W., Bertolini, G., Carnevale, E., Favalli, M., Fornaciai, A., Alavedra, J. M., Mucchi, L., Nannipieri, L., Rodriguez-Lloveras, X., Pizziolo, M., Schina, R., Trippi, F., & Casagli, N. (2018). Application of an ultra-wide band sensor-free wireless network for ground monitoring. *Engineering Geology*, 238, 1–14.
11. 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>
12. Lacasse, S. (2013). Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. In *Proc. 18th intern. conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2-6 September 2013, (pp. 15–34).
13. Lollino, G., Chiara, A. (2006). UNESCO World Heritage sites in Italy affected by geological problems, specifically landslide and flood hazard. *Landslides*, 3(4), 311–321.
14. Matveev, I.V., Milavskiy, V.G., Kasil, A.I., & Ishchenko, Yu.I. (2009). Buildings serviceability restoration and reconstruction in the Kyiv urban conditions. In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (Vol. 1, 2, 3 and 4, pp. 1197–1200). <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-1197>
15. Sevilla Metropol Parasol Antiquarium I, Homepage. (2019). Retrieved from <https://www.360cities.net/image/sevilla-metropol-parasol-antiquarium-i>
16. Slyusarenko, Y., Matveyev, I., Kasil, A., Ischenko, Y., Romanov, O., & Kosheleva, N. (2015). Solution of the geotechnical problems of the Poshtova Square reconstruction in Kiev. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. In *Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2015*, (pp. 693–698).

17. 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>
18. Vanicek, I., Jirasko, D., & Vanicek, M. (2013). Geotechnical engineering and protection of environment and sustainable development. In *Proc. of the 18th IC SMGE Challenges and Innovations in Geotechnics*. Paris: Presses de l'école national des ponts et chaussees.
19. Vanicek, I. (2016). Application of Eurocode 7 to soil structures. *World of Geotechnics*, 4, 4–8 [in Russian].
20. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., & Berchun, V. (2017). Landslide stabilization in building practice: methodology and case study from Autonomous Republic of Crimea. In *Proceedings of the WLF4*, (pp. 587–595). Springer-Verlag, Berlin, Germany.
21. Trofymchuk, O., & Kaliukh, I. (2013). Activation of landslides in the south of Ukraine under the action of natural seismic impacts (experimental and analytical studies). *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2(2), 68–76.
22. Ishchenko, Yu.I., Slyusarenko, Yu.S., Melashenko, Yu.B., Yakovenko, M.S., & Ben, I.V. (2020). Geotechnical monitoring in conditions of dense urban development. *Science and construction*, 3, 13–25 [in Ukrainian].
23. 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>
24. Kaliukh, I., Dunin, V., Marienkov, M. et al. (2023). Peculiarities of Applying the Risk Theory and Numerical Modeling to Determine the Resource of Buildings in a Zone of Influence of Military Actions. *Cybern Syst Anal*, 59, 612–623. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00596>
25. Slyusarenko, Y. et al. (2023). Experimental Solving the Problem of the Shelter Object Reinforced Concrete Structures Thermal Expansion. In: Ilki, A., Çavunt, D., Çavunt, Y.S. (Eds.). *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient*. fib Symposium 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 350. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_173
26. 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>

Стаття надійшла до редакції 22.03.2024 і прийнята до друку після рецензування 07.06.2024

The article was received 22.03.2024 and was accepted after revision 07.06.2024

Святогоров Ілля Олегович

аспірант кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com

УДК 504.4.054

Oleksandra Kovalska, graduate student of the Department of Ecology
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-7173-2563>
e-mail: alexandraschwarz2313@gmail.com

Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

WATER DANGER IN THE CITY OF MYKOLAIV UNDER WARTIME CONDITIONS

***Abstract.** Armed conflicts disrupt social, ecological and economic processes. In connection with the Russian aggression, the water main that supplied water from the Dnipro River in the Kherson region to Mykolaiv was damaged, as a result of which the city was left without a stable system of centralized water supply. To study the level of water danger in the city of Mykolaiv during the wartime period, an original questionnaire was developed, which included questions aimed at determining the frequency of situations related to the risk of water use. It was determined that the level of water danger in the city was about 40%, which is a fairly high indicator and indicates significant risks associated with water use. Recommendations were developed that for a sustainable water supply of the city under the conditions of armed conflicts and emergency situations, there is an urgent need for the formation of a new water service system through the increase of sources of decentralized water supply and the creation of a reserve reservoir as a strategic water supply of the city.*

***Key words:** environmental safety, water safety, water supply, water resources, decentralized water supply system.*

О.І. Ковальська

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна

ВОДНА НЕБЕЗПЕКА МІСТА МИКОЛАЄВА ЗА УМОВ ВОЄННОГО ЧАСУ

***Анотація.** Збройні конфлікти порушують соціальні, екологічні та економічні процеси. У зв'язку з російською агресією відбулося пошкодження водогону, який постачав воду з річки Дніпро на Херсонщині до Миколаєва, через що місто залишилося без сталої системи централізованого водопостачання. Для дослідження рівня водної небезпеки міста Миколаєва за період воєнного часу розробили оригінальну анкету, яка охоплювала запитання, спрямовані на визначення частоти ситуацій, пов'язаних із ризиком водокористування. Визначено, що рівень водної небезпеки міста склав близько 40%, що є достатньо високим показником і свідчить про значні ризики, пов'язані з водокористуванням. Розробили рекомендації, що для сталого водопостачання міста за умов збройних конфліктів, аварійних ситуацій є загальна потреба у формуванні нової системи водного сервісу через збільшення джерел децентралізованого водопостачання та створення резервного водосховища як стратегічного запасу води міста.*

***Ключові слова:** екологічна безпека, водна безпека, водопостачання, водні ресурси, система децентралізованого водопостачання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.48-63>

Вступ

Проблема водопостачання питної води під час військового часу відноситься до числа соціально значущих, оскільки визначає ступінь екологічної та епідеміологічної безпеки здоров'я населення.

Збройні конфлікти формують та руйнують соціально-екологічні системи та послаблюють їхню здатність задовольняти основні потреби місцевих спільнот. Вплив конфліктів на водні системи особливо актуальний для безпеки людини, оскільки вони можуть негативно позначитися на інших основних потребах, таких як громадська охорона здоров'я та засоби існування.

У зв'язку з російською агресією 12 квітня 2022 року було пошкоджено водогін, який постачає воду з річки Дніпро на Херсонщині до Миколаєва, тому питання водопостачання під час воєнного стану є дуже актуальним. Водогін був пошкоджений в місці, де він виходить на поверхню з-під землі. Трубопровід протікав приблизно протягом восьми годин після того, як його було підірвано, внаслідок чого було втрачено близько 40 мільйонів літрів води, перш ніж подачу до нього припинили. Миколаїв залишився без централізованого водопостачання.

З часом було ухвалено рішення підключитися до водозабору технічної води з Бузького лиману. Це насосна станція заводу "Зоря-Машпроект" для технічного водопостачання виробництва. З 6 травня вода до міської водопровідної мережі стала подаватися з Бузького лиману, попередньо проходячи часткове очищення на очисних спорудах водопроводу.

Вода, яка подається до централізованої системи водопостачання Миколаєва, навіть після очищення не відповідає вимогам Державних санітарних норм та правилам «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» [1]. Показники якості води, яка подавалась до централізованої системи водопостачання Миколаєва з Бузького лиману, перевищують норми хлоридів, сульфатів, зважених речовин, жорсткості тощо. Вода придатна лише для побутових потреб.

Подавання води з лиману призводить до негативних наслідків. Великий вміст солі у воді призводить до швидкого руйнування самої системи водопостачання [2, 3]. Прориви у мережі не тільки залишають людей без води, але мають негативні наслідки для екосистеми, а саме: забруднення ґрунтових, підґрунтових та природних вод; підтоплення територій; забруднення водних об'єктів; пригнічення та загибель водної біоти та інші.

Основними джерелами питного водопостачання міста за умов воєнного часу були і поки залишаються: по-перше, свердловини, які знаходяться на території приватного сектору, деяких підприємств і установ; по-друге, привозна вода з інших міст; по-третє, бутильована вода.

Мета досліджень

Мета даних досліджень полягає в аналізі водного сервісу та водної небезпеки в місті Миколаєві. Результати дослідження можуть бути використані під час розробки заходів щодо поліпшення стану питного водопостачання та для оцінювання впливу наслідків воєнних дій на соціоекосистему міста.

Результати дослідження

Питаннями впливу збройних конфліктів на систему централізованого водопостачання займалися багато вітчизняних та закордонних вчених. Аналіз досліджень різних авторів показав, що під час воєнних дій може здійснюватися вплив на кожний компонент водопостачання, а саме: на водні ресурси; фізичну інфраструктуру; експлуатацію та технічне обслуговування; фінанси; споживачів ресурсів [4–10].

В місті Миколаєві найбільшого негативного впливу зазнала фізична інфраструктура. Відбулося пошкодження ділянки водогону "Дніпро-Миколаїв" біля села Киселівка Херсонської області, через руйнування водогону Миколаїв залишився без централізованого водопостачання. Відремонтувати водогін та налагодити водопостачання не було можливим, тому що правобережну частину Херсонської області окупували російські війська.

На початку серпня 2022 року під час обстрілу очисних споруд міста Миколаєва, що розташовані біля села Галицинове, було завдано великої шкоди технологічному обладнанню, також пошкоджень зазнали три насосні станції каналізації [11].

Основним впливом конфлікту на водні ресурси міста Миколаєва є забруднення ґрунтових, підґрунтових та природних вод, через те що великий вміст солі у воді призводить до швидкого роз'їдання труб, переважно тих, що були закладені багато років тому, проте руйнуються й відносно нові труби через погану якість води. Солоня вода призводить до регулярних проривів у мережі, відбуваються аварійні ситуації та протікання технічної води, яку постачають у місто, забруднюючи ґрунт та ґрунтові води.

У зв'язку з відсутністю централізованого водопостачання в місті почали робити нові свердловини для забезпечення населення прісною водою. Артезіанські свердловини є стратегічним резервом для України. З артезіанських свердловин беруть воду з глибини понад 300 метрів. Вода на такій глибині не містить шкідливих речовин, важких металів, радіонуклідів та вважається найбільш безпечною [12]. Тим не менш, бойові дії, що продовжуються, і руйнування можуть поставити ці колодязі під загрозу забруднення. Додавання всього однієї забруднюючої речовини у водоносний горизонт робить воду непридатною для споживання протягом тривалого часу, оскільки водообмін відбувається протягом сотень років.

Останні дослідження стану якості води в свердловинах міста Миколаєва показали, що мікробіологічні показники та хлориди перевищують нормативи, тому цю воду можна використовувати тільки для побутових потреб, наприклад миття посуду.

В Миколаєві бойові дії призвели до проблем з експлуатацією та технічним обслуговуванням водопостачання. Через воєнні дії, руйнування житла велика кількість кваліфікованого персоналу виїхала з міста. Відсутність кваліфікованого персоналу на підприємстві «Миколаївводоканал» [13] негативно вплинула на швидкість та якість ліквідації аварійних ситуацій, розробку альтернативних шляхів для вирішення проблем, а також контроль за якістю виконуваної роботи.

Також у зв'язку з погіршенням місцевого виробництва, логістики та імпорту доступ до хімічних речовин для обробки води, матеріалів та запасних

частин, які необхідні для ремонту пошкоджених об'єктів, був частково обмежений, тому мешканцям доводилося довгий час очікувати відновлення водопостачання.

Пошкодження електроенергетичної інфраструктури спричиняє брак електроенергії та обмежує експлуатацію об'єктів водопостачання. Відсутність стабільного електропостачання призводить до зношення водоочисних та гідротехнічних споруд [14].

Усі компоненти водопостачання пов'язані між собою, тому погіршення стану будь-якої частини може негативно позначитися на водній та екологічній безпеці, що і відбулося у зв'язку з пошкодженням водогону.

Для дослідження рівня водної небезпеки міста Миколаєва за період воєнного часу розроблена оригінальна анкета. За основу створення анкети було взято дослідження «The Household Water Insecurity Experiences (HWISE) Scale: comparison scores from 27 sites in 22 countries» [15]. Анкета охоплювала запитання, спрямовані на визначення частоти ситуацій, пов'язаних із ризиком водокористування. Питання умовно поділялись на декілька груп:

- режим водопостачання;
- якість та кількість води для побутових потреб;
- психологічний стан населення.

У зв'язку з тим, що централізоване водопостачання домогосподарств було порушено, мешканцям міста довелося набирати воду в пунктах роздачі, купувати, використовувати воду зі свердловин, річки тощо. Наскільки населення відчувало нестачу води для задоволення всіх домашніх потреб, можна побачити на діаграмі нижче (рис. 1).



Рис. 1. Як часто за період війни населення турбувалось, що не вистачить води для задоволення всіх домашніх потреб

Відсутність водопостачання призводить до порушення санітарних норм, люди перестають дотримуватися правил гігієни, через це виникають інфекційні захворювання та епідемії. Як часто мешканцям доводилося не мити руки після брудних дій через проблеми з водою, проілюстровано на наступній діаграмі (рис. 2).



Рис. 2. Як часто за період війни доводилося не мити руки після брудних дій через проблеми з водою

Порушення дотримання правил гігієни може призвести не тільки до виникнення інфекційних захворювань, але і до виникнення захворювань шкіри, пригнічення самопочуття, якщо не мити тіло кожен день. Як часто респондентам доводилося обходитися без миття тіла через проблеми з водою, можна побачити на наступній діаграмі (рис. 3).

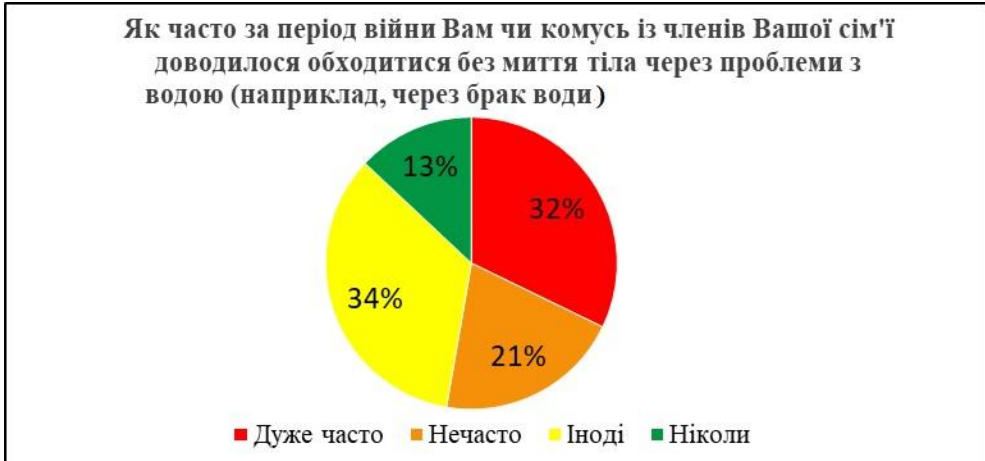


Рис. 3. Як часто за період війни доводилося обходитися без миття тіла через проблеми з водою

Як часто мешканці переймалися, що через відсутність адекватної кількості води відповідної якості їм доводилося змінювати робочі графіки, режим дня та плани, можна побачити на діаграмі нижче (рис. 4). Зміна робочих графіків та режиму дня призводить до порушення стабільної роботи підприємств, негативно впливає на бізнес та змушує відмовлятися від своїх планів – порушується ритм життя цілих систем.



Рис. 4. Як часто за період війни доводилося змінювати графіки, плани через проблеми з водою

Для нормального функціонування організму треба вживати достатню кількість питної води. Як часто населення переймалося, що вони не зможуть випити стільки води, скільки їм хотілося б, проілюстровано на рис. 5.

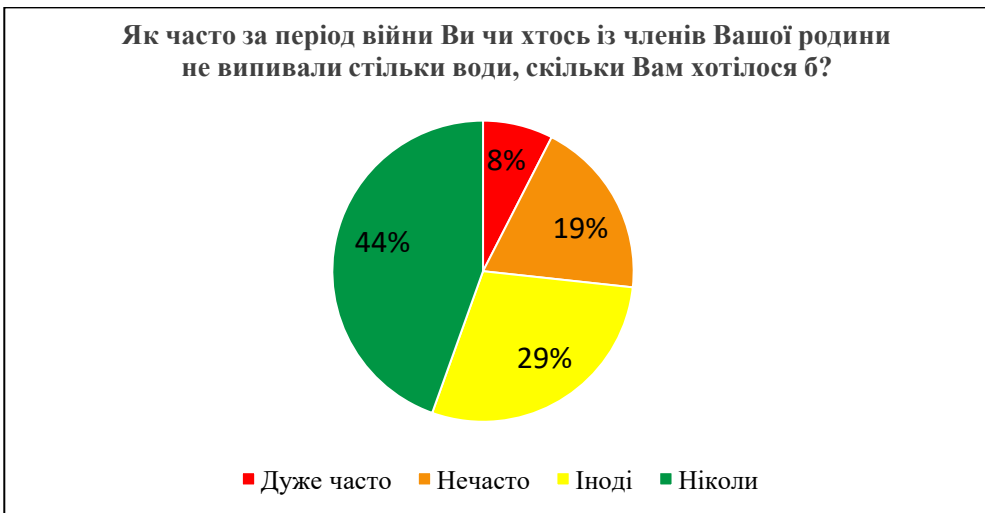


Рис. 5. Як часто за період війни мешканці не випивали стільки води, скільки хотілося

Для приготування їжі, миття продуктів та посуду кожній людині потрібна достатня кількість чистої питної води. Через відсутність водопостачання люди не в змозі приготувати їжу, до якої вони звикли. Харчування повинне бути здоровим та раціональним, особливо у дітей та людей, які страждають від захворювань. Як часто мешканцям доводилося змінювати свою їжу через проблеми з водою, можна побачити на діаграмі нижче (рис. 6).

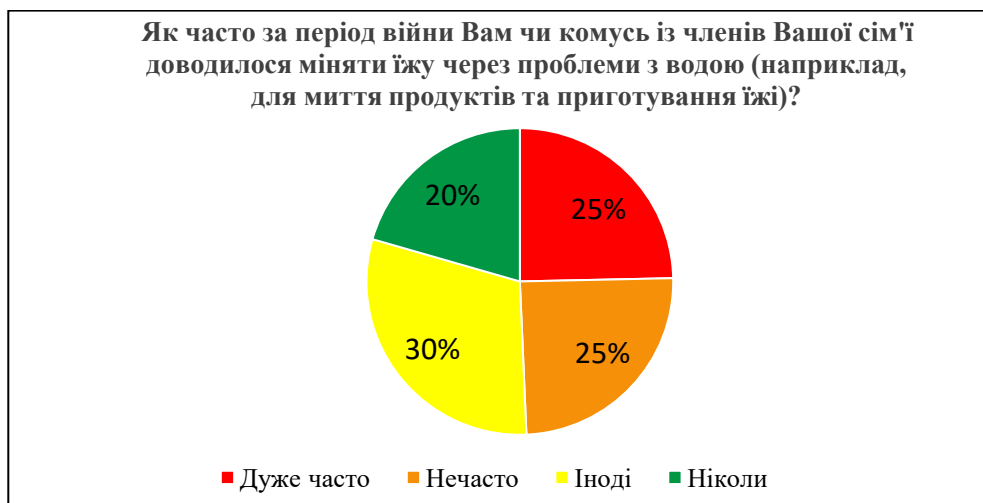


Рис. 6. Як часто за період війни доводилося змінювати їжу через проблеми з водою

Якість води залежить від хімічного і біологічного складу, а також від фізичних властивостей води водного об'єкта. Від якості води залежить, наскільки вона придатна для вживання або використання для побутових потреб. Використання або вживання неякісної питної води загрожує здоров'ю людини, призводить до пошкодження системи водопостачання та побутової техніки. Як часто в домогосподарствах міста Миколаєва не було придатної для використання чи питної води, проілюстровано на рис. 7.

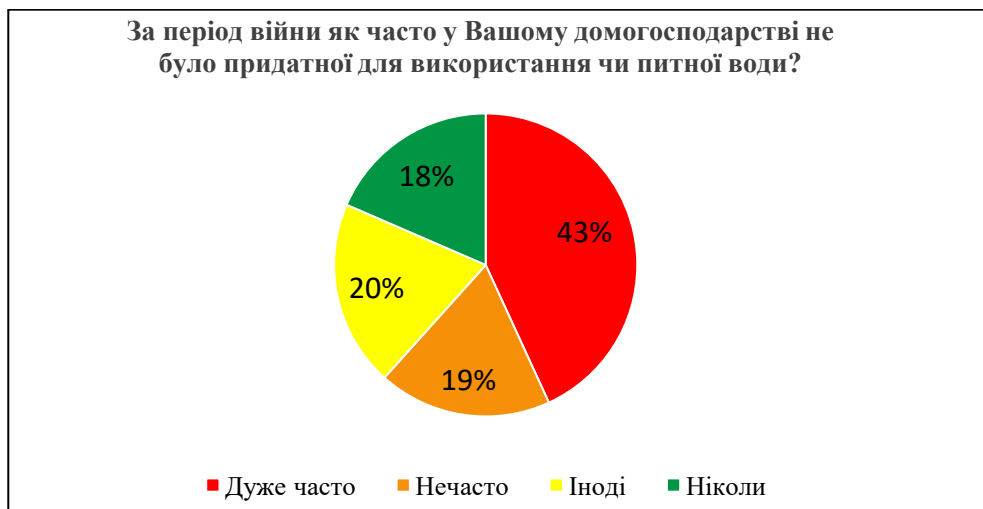


Рис. 7. За період війни як часто у домогосподарстві не було придатної для використання чи питної води

На наступній діаграмі (рис. 8) можна побачити, як часто у домогосподарстві не вистачало води або через її погану якість мешканці не могли прати одяг.



Рис. 8. Як часто за період війни у домогосподарстві не вистачало води або через її погану якість не прали одяг

Через недостатнє очищення води відбувається псування труб, побутової техніки та сантехніки в домогосподарствах (рис. 9).



Рис. 9. Як часто за період війни через погану якість води псувалися труби, сантехніка, побутова техніка

Найбільша проблема, яку відчуває населення міста Миколаєва, є відсутність стабільного режиму водопостачання питної води в домогосподарства. На діаграмі нижче можна побачити, як часто за період війни подача води у домашнє господарство з основного джерела води переривалася або обмежувалася (рис. 10). За весь час воєнного стану миколаївці дуже гостро відчувають проблему відсутності стабільного режиму водопостачання, яке порушилося через руйнування ділянки водогону «Дніпро-Миколаїв» та аварії, які відбуваються через псування мережі.



Рис. 10. Як часто за період війни подача води у домашнє господарство з основного джерела переривалася або обмежувалася

Після руйнування ділянки водогону «Дніпро-Миколаїв» для забезпечення водою мешканці почали користуватися альтернативними джерелами, а саме свердловинами. До свердловин під'єднали критичну інфраструктуру та лікарні. На діаграмі можна побачити, як часто за період війни населення користувалося свердловинами (рис. 11).



Рис. 11. Як часто за період війни користувалися свердловинами

Також рівень небезпеки підвищується, коли мешканцям доводиться ходити за водою під час повітряної тривоги (рис. 12). Незважаючи на те, що під час повітряної тривоги треба ховатися в укриттях, люди, найчастіше, продовжують стояти в чергах за водою.



Рис. 12. Як часто мешканцям доводилось ходити за водою під час повітряної тривоги

Відсутність водопостачання також негативно впливає на психологічний стан населення. Через відсутність води відповідної якості людина не може задовольнити всі свої потреби, тому кожна людина може відчувати пригнічення, депресію та обурення. Через пригнічений стан населення все менше дотримується правил безпеки, адже починає звикати до такого стану. Як часто за період війни респонденти обурювались на ситуацію з водою, можна побачити на діаграмі нижче (рис. 13).



Рис. 13. Як часто за період війни респонденти обурювались на ситуацію з водою

В анкетуванні були присутні питання соціально-демографічного блоку: вік; рівень освіти; стать.

Вік впливає на фізичний та психологічний стан організму. Для виявлення, яка частина населення брала участь в анкетуванні, чи не однобічний погляд респондентів з точки зору віку та їх можливостей, було проведено опитування. Нижче на діаграмі можна побачити вікову категорію респондентів, котрі проходили опитування (рис. 14).

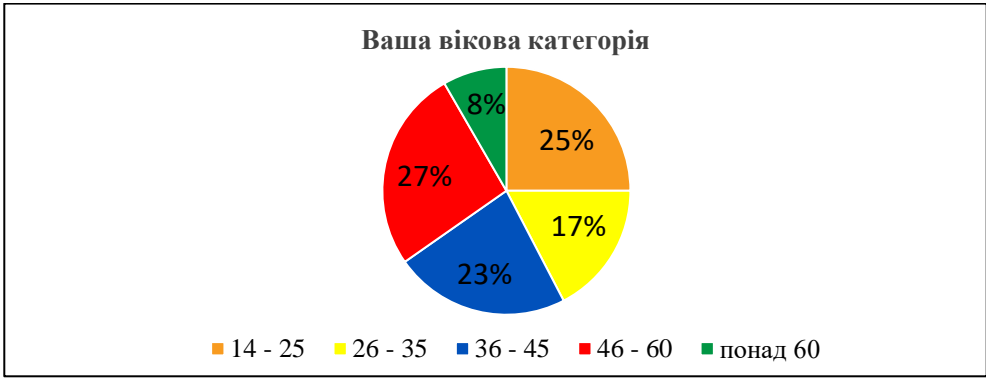


Рис. 14. Вікова категорія респондентів

Нижче на діаграмі можна побачити рівень освіти респондентів, які проходили опитування (рис. 15).

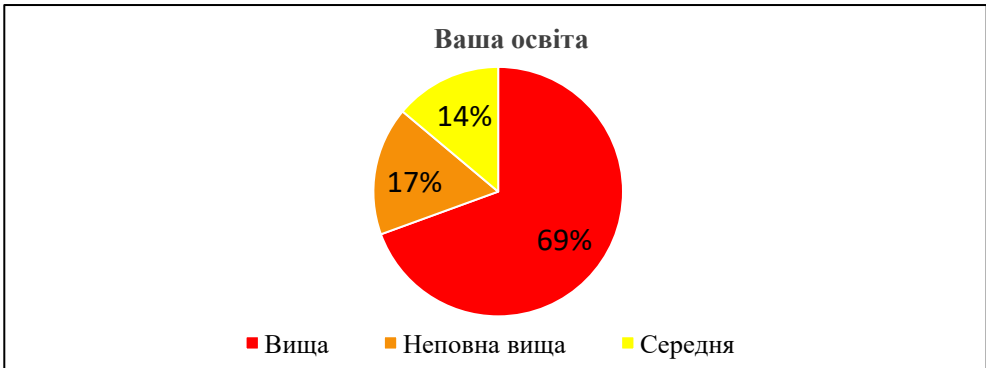


Рис. 15. Рівень освіти респондентів

На наступній діаграмі зображено, скільки опитуваних було чоловічої та жіночої статі (рис. 16).

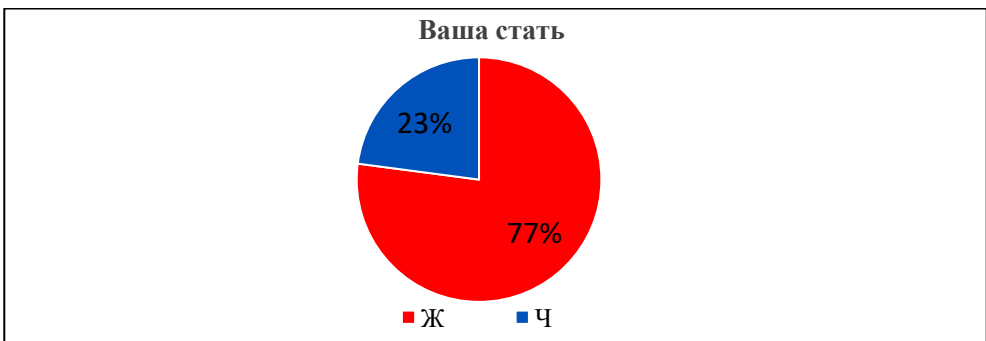


Рис. 16. Стать респондентів

Кожне питання анкети відображає досвід респондентів, пов'язаний з адекватним забезпеченням водою (наявність достатньої кількості води для пиття та побутових потреб), споживанням (наявність води за потреби), безпекою (вода, придатна для використання, наприклад для пиття або купання) та психологічним станом населення, який порушується через брак централізованого водопостачання питної води в домогосподарства.

Завдяки питанням було виявлено частоту переживань населення, пов'язаних з водою, протягом війни в місті Миколаєві.

Отже, за результатами проведеного анкетування було визначено, що через відсутність адекватної та безпечної води для здорового та продуктивного життя, можна сказати що в місті підвищився рівень водної небезпеки.

Умовно можна виділити такі рівні водної небезпеки (табл. 1).

Табл. 1. Рівні водної небезпеки

Рівні	Відсоток відповідей «дуже часто»
Високий	$\geq 51\%$
Середній	30–50%
Низький	1%–29%
Відсутній	$\leq 1\%$

Для визначення рівня водної небезпеки було проаналізовано загальну кількість відповідей «дуже часто», «нечасто», «іноді» та «ніколи» (рис. 17).

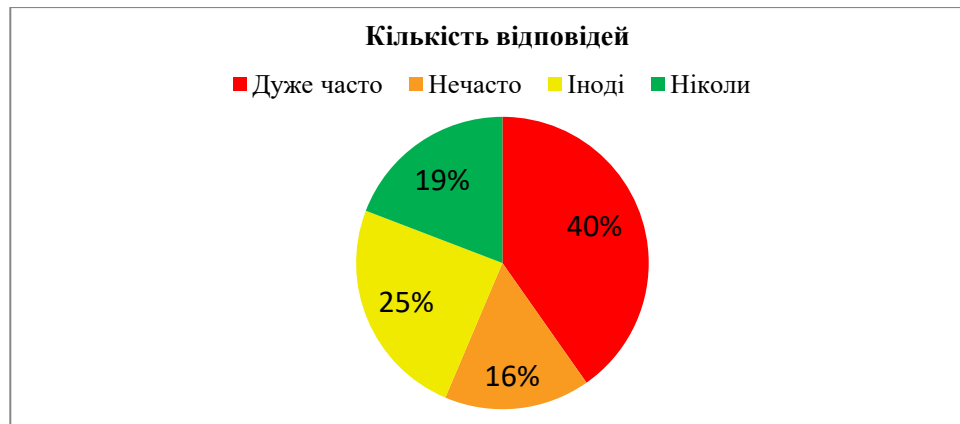


Рис. 17. Кількість відповідей «дуже часто», «нечасто», «іноді», «ніколи»

Відсоток відповідей «дуже часто» дорівнює 40%, тому можна визначити, що рівень водної небезпеки міста Миколаєва середній.

Можна зробити висновки, що насправді рівень водної небезпеки зростає. Якщо не вживати заходів, то рівень водної небезпеки може зрости до «високого».

Місто Миколаїв поділяється на райони: Заводський, Центральний, Корабельний та Інгульський. Для того щоб визначити, в якому районі найбільший рівень водної небезпеки, було проаналізовано кількість відповідей «дуже часто», «нечасто», «іноді» та «ніколи» за районами (рис. 18).

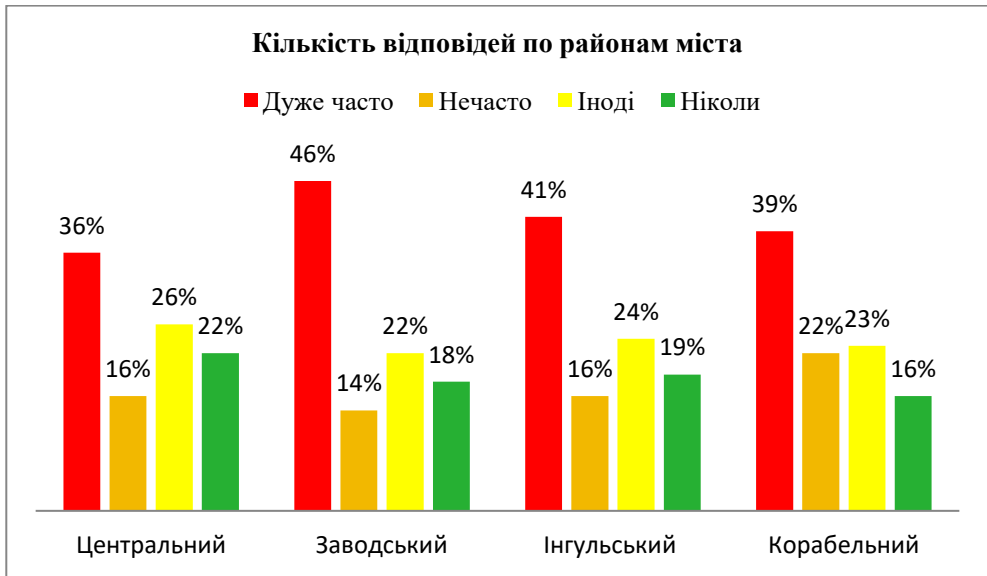


Рис. 18. Кількість відповідей «дуже часто», «нечасто», «іноді» та «ніколи» по районах міста Миколаєва

Проаналізувавши кількість відповідей «дуже часто» по районах міста Миколаєва, можна визначити, в якому районі місцеве населення сильніше відчуває проблеми з водопостачанням. На наступній діаграмі можна побачити, в якому районі міста Миколаєва більший рівень водної небезпеки (рис. 19).



Рис. 19. Рівні водної небезпеки по районах міста Миколаєва

Центральний та Заводський райони найбільш схильні до підвищення рівня водної небезпеки. В цих районах мешканці найсильніше потерпають через відсутність водопостачання. Одна з головних проблем – це постійні прориви в мережі, аварії. Водопостачання переривається на декілька днів, людям доводиться обмежувати себе у своїх потребах.

Висновки

За період війни система водопостачання та водовідведення міста Миколаєва зазнала значних негативних наслідків щодо кожного компоненту водопостачання.

Через відсутність адекватної та безпечної води для здорового та продуктивного життя виникла водна небезпека. Водна небезпека негативно впливає на кожен сферу життєдіяльності та може призвести до шкідливих наслідків як для суспільства, так і соціоекосистеми.

Прориви у мережі та аварійні ситуації дуже негативно впливають на навколишнє середовище, під час аварій втрачається велика кількість води, також відбувається забруднення ґрунтових, підґрунтових, природних вод та підтоплення території.

Визначено, що загалом рівень водної небезпеки міста Миколаєва є «середнім». Найбільший рівень небезпеки спостерігається у Центральному районі, далі іде Заводський, Інгульський і Корабельний райони відповідно.

Для сталого водопостачання міста за умов збройних конфліктів, аварійних ситуацій є нагальна потреба у формуванні нової системи водного сервісу через збільшення джерел децентралізованого водопостачання, реанімацію Жовтневого водосховища, як стратегічного резерву води міста, або створення іншого альтернативного джерела. Також нагальною є просвітницька робота серед населення щодо заходів щодо водозбереження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» : Наказ від 12 трав. 2010 р. № 400. – [Електронний ресурс]. – Дата звернення 10.02.2024. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
2. Мітрасова О.П. (2022). Оцінювання стану водного об'єкту як умова попередження екологічного ризику. Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій // Збірка матеріалів доп. учасн. І Міжнародної наук.-практ. конф. Полтава, Львів (2022).
3. О.П. Мітрасова, В.М. Смирнов, А.Д. Мац (2023). Екологічна якість вод Бузького лиману відповідно водної рамкової директиви // Збірник тез XVII Міжнародної наукової конференції «Радіаційна і техногенно-екологічна безпека людини та довкілля: стан, шляхи і заходи покращення» // «Ольвійський форум – 2023: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі» // Миколаїв : Чорноморський національний університет імені Петра Могили, 2023. 53–56.
4. Строкаль В.П., Ковпак А.В. (2022). Военні конфлікти та вода: наслідки й ризику. Екологічні науки. 5 (44), 96-97. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14>
5. M.M. Aklan, C. de Fraiture, L.G. Hayde (2019). Which Water Sources Do People Revert to in Times of War? Evidence from the Sana'a Basin Yemen. *International Journal of Environmental Research*, 13, 623–638. <https://doi.org/10.1007/s41742-019-00205-9>
6. Juliane Schillinger, Gül Özerol, Michiel Heldeweg (2022). A social-ecological systems perspective on the impacts of armed conflict on water resources management: Case studies from the Middle East. *Journal of Geoforum*, 133, 101-116. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.05.001>
7. Binaya Kumar Mishra, Pankaj Kumar, Chitresh Saraswat, Shamik Chakraborty, Arjun Gautam (2021). Water Security in a Changing Environment: Concept, Challenges and Solutions. *Journal of Water*, 13(4), 490. <https://doi.org/10.3390/w13040490>

8. Хільчевський В.К. (2022). Водні та збройні конфлікти – класифікаційні ознаки: у світі та в Україні. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 1(63). <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.1>
9. Birkett D.M. (2017). Water Critical Infrastructure Security and Its Dependencies *Journal of Terrorism Research*, 8(2), 1-21. <https://doi.org/10.15664/jtr.1289>
10. Зелінський С.Е. (2022). Водопостачання та водна безпека у контексті російської агресії. Кропивницький, 12–15. – [Електронний ресурс]. – Дата звернення 12.10.2023. – Режим доступу: <http://surl.li/erapp>
11. Пошкодження водогону та обстріли інфраструктури водопостачання: порушення рф міжнародного гуманітарного права. – [Електронний ресурс]. – Дата звернення 01.02.2024. – Режим доступу: <http://surl.li/qjsdg>
12. Про користь та недоліки артезіанської води. – [Електронний ресурс]. – Дата звернення 13.12.2023. – Режим доступу: https://sm.darg.gov.ua/_pro_koristj_ta_nedoliki_0_0_0_912_1.html
13. Про водоканал. – [Електронний ресурс]. – Дата звернення 03.12.2023. – Режим доступу: <http://surl.li/esbrm>
14. Давиденко Н.В. (2018). Моніторинг ефективності електроспоживання насосних станцій системи комунального водопостачання з урахуванням чинників зовнішнього середовища // автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. технічних наук. Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2018, 26. – [Електронний ресурс]. – Дата звернення 05.12.2023. – Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/20126>
15. Justin Stoler and others (2021). The Household Water Insecurity Experiences (HWISE) Scale: comparison scores from 27 sites in 22 countries. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 11 (6), 1102–1110. <https://doi.org/10.2166/washdev.2021.108>

Стаття надійшла до редакції 07.03.2024 і прийнята до друку після рецензування 05.06.2024

REFERENCES

1. Pro zatverdzhennja Derzhavnyh sanitarnyh norm ta pravyl «Gigijenichni vymogy do vody putnoi', pryznachenoj' dlja spozhyvannja ljudyjnoju»: Nakaz vid 12 trav. 2010 r. №400. Retrieved 10.02.2024 from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> [in Ukrainian].
2. Mitryasova, O.P. (2022). Ocynjuvannja stanu vodnogo ob'jektu jak umova poperedzhennja ekologichnogo ryzyku. Podolannja ekologichnyh ryzykiv ta zagroz dlja dovkilja v umovah nadzvyčajnyh sytuacij. In *Zbirka materialiv dop. uchasn. I Mizhnarodnoi' nauk.-prakt. konf.* Poltava, L'viv [in Ukrainian].
3. Mitryasova, O.P., Smyrnov, V.M., Mac, A.D. (2023). Ekologichna jakist' vod Buz'kogo lymanu vidpovidno vodnoi' ramkovoї dyrektyvy. In *Zbirnyk tez XVII Mizhnarodnoi' naukovoi' konferencii' «Radiacijna i tehnogenno-ekologichna bezpeka ljudyny ta dovkilja: stan, shljahy i zahody pokrashennja»*. «Ol'vijs'kyj forum – 2023: strategii' krai'n Prychornomors'kogo regionu v geopolitychnomu prostori». Mykolai'v: Chornomors'kyj nacional'nyj universytet imeni Petra Mogyly, 2023. 53–56 [in Ukrainian].
4. Stokal', V.P., Kovpak, A.V. (2022). Vojenni konflikty ta voda: naslidky j ryzyku. *Ekologichni nauky*, 5 (44), 96-97. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14> [in Ukrainian].
5. Aklan, M.M., de Fraiture, C., Hayde, L.G. (2019). Which Water Sources Do People Revert to in Times of War? Evidence from the Sana'a Basin Yemen. *International Journal of Environmental Research*, 13, 623–638. <https://doi.org/10.1007/s41742-019-00205-9>
6. Schillinger, J., Özerol, G., Heldeweg, M. (2022). A social-ecological systems perspective on the impacts of armed conflict on water resources management: Case studies from the Middle East. *Journal of Geoforum*, 133, 101-116. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.05.001>

7. Binaya Kumar Mishra, Pankaj Kumar, Chitresh Saraswat, Shamik Chakraborty, Arjun Gautam (2021). Water Security in a Changing Environment: Concept, Challenges and Solutions. *Journal of Water*, 13(4), 490. <https://doi.org/10.3390/w13040490>
8. Khilchevsky, V.K. (2022). Vodni ta zbrojni konflikty – klasyfikacijni oznaky: u sviti ta v Ukrai'ni. *Gidrologija, gidrohimiya i gidroekologija*, 1(63). <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.1> [in Ukrainian].
9. Birkett, D.M. (2017). Water Critical Infrastructure Security and Its Dependencies. *Journal of Terrorism Research*, 8(2), 1-21. <https://doi.org/10.15664/jtr.1289>
10. Zelins'kyj, S.E. (2022). Vodopostachannja ta vodna bezpeka u konteksti rosij's'koi' agresii'. *Kropyvnyč'kyj*, 12–15. Retrieved 12.10.2023 from <http://surl.li/erapp> [in Ukrainian].
11. Poshkodzhennja vodogonu ta obstrily infrastruktury vodopostachannja: porushennja rf mizhnarodnogo gumanitarnogo prava. Retrieved 01.04.2024 from <http://surl.li/qjsdg> [in Ukrainian].
12. Pro koryst' ta nedoliki artezians'koi' vody. Retrieved 13.12.2023 from https://sm.darg.gov.ua/_pro_koristj_ta_nedoliki_0_0_0_912_1.html [in Ukrainian].
13. Pro vodokanal. Retrieved 03.12.2023 from <http://surl.li/esbrm> [in Ukrainian].
14. Davydenko, N.V. (2018). Monitoryng efektyvnosti elektrospozhyvannja nasosnyh stancij systemy komunal'nogo vodopostachannja z urahuvannjam chynnykiv zovnishn'ogo seredovyshha. Avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja kand. tehnicnyh nauk. Vinnyc'kyj nacional'nyj tehnicnyj universytet. Vinnycja, 2018, 26. Retrieved 05.12.2023 from <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/20126> [in Ukrainian].
15. Justin Stoler; Joshua D. Miller; Ellis A. Adams; Farooq Ahmed; Mallika Alexander; Gershim Asiki, Sera L. Young (2021). The Household Water Insecurity Experiences (HWISE) Scale: comparison scores from 27 sites in 22 countries. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 11 (6), 1102–1110. <https://doi.org/10.2166/washdev.2021.108>

The article was received 07.03.2024 and was accepted after revision 05.06.2024

Ковальська Олександра Ігорівна

аспірантка кафедри екології Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Адреса робоча: вул. 68 Десантників 10, Миколаїв, Миколаївська область, 54000

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-7173-2563>

e-mail: alexandraschwarz2313@gmail.com

УДК 628.4.08

Ihor Satin^{1,2}, PhD, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture, Acting deputy director, Scientific, Research, Design and Technology Institute of Municipal Economy, State Enterprise

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2028-9791> *e-mail*: satin@nikti.org.ua

Tetyana Romanova², PhD, Head of the Laboratory

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-8270> *e-mail*: romanova@nikti.org.ua

Olena Panchenko², Head of the Laboratory

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3680-7036> *e-mail*: panchenko@nikti.org.ua

¹Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

²Scientific, Research, Design and Technology Institute of Municipal Economy, State Enterprise, Kyiv, Ukraine

IMPROVEMENT OF MECHANICAL AND BIOLOGICAL TREATMENT TECHNOLOGIES ACCORDING TO THE MORPHOLOGICAL AND FRACTIONAL COMPOSITION OF HOUSEHOLD WASTE

Abstract. *Achieving the goals of reducing the volume of municipal waste disposal by 30% by 2030, as established by the National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030, may become feasible following the establishment of municipal waste management infrastructure.*

The results of the research on the morphological composition of municipal waste are utilized in waste management sector planning, estimating the expected biogas quantity at municipal waste landfills, determining the amount of heat that can be harnessed from the incineration of municipal waste. The research also highlights the impact of waste composition on the completeness and capacity of waste sorting lines and its influence on the cost of construction and maintenance.

The material balance exerts the most significant influence on the technical and economic indicators of waste sorting enterprises, including mechanical-biological treatment facilities. Material balance calculations are carried out based on the morphological and fractional composition of municipal waste.

This article presents the results of research into the morphological composition of municipal waste generated in the populated areas of the Sumy urban territorial community. Additionally, findings regarding the fractional composition of municipal waste generated in the city of Kyiv are provided. Based on the results of the morphological and fractional composition research, material balances for municipal waste were calculated, using a simplified technological scheme for mechanical-biological treatment as an illustrative example.

Key words: *municipal solid waste management, municipal solid waste, municipal solid waste collection, transportation, recovery, disposal, mixed municipal solid waste, material balance, mechanical-biological treatment, morphological composition, fractional composition.*

І.В. Сатін^{1,2}, Т.І. Романова², О.С. Панченко²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

²Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», м. Київ, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МЕХАНІКО-БІОЛОГІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗА МОРФОЛОГІЧНИМ ТА ФРАКЦІЙНИМ СКЛАДОМ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

***Анотація.** Досягнення цілей зі зменшення обсягу захоронення побутових відходів до 30% у 2030 році, які встановлені Національною стратегією управління відходами в Україні до 2030 року, можливо після створення інфраструктури управління побутовими відходами.*

Результати дослідження морфологічного складу побутових відходів використовують при плануванні сектору управління відходами, для визначення очікуваної кількості біогазу на полігонах побутових відходів, для визначення кількості теплоти, яка може бути відведена при спалюванні побутових відходів, а також відмічаються вплив складу відходів на комплектність та потужність сміттесортувальних ліній, вплив на вартість будівельних робіт та обслуговування.

Найбільший вплив на техніко-економічні показники сміттесортувальних підприємств, в тому числі установок механіко-біологічної обробки, має матеріальний баланс. Розрахунки матеріального балансу виконують на основі морфологічного та фракційного складу побутових відходів.

У статті наведено результати досліджень морфологічного складу побутових відходів, які утворюються в населених пунктах Сумської міської територіальної громади. Наведено результати досліджень фракційного складу побутових відходів, які утворюються в місті Київ. На основі результатів досліджень морфологічного та фракційного складу було розраховано матеріальний баланс побутових відходів на прикладі спрощеної технологічної схеми механіко-біологічного оброблення.

***Ключові слова:** управління побутовими відходами, побутові відходи, збирання, перевезення, відновлення, видалення, змішані побутові відходи, матеріальний баланс, механіко-біологічне оброблення, морфологічний склад, фракційний склад.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.64-77>

Вступ

Постановка завдання. За оцінкою Мінінфраструктури, в Україні за 2022 рік утворилось понад 39 млн м³ побутових відходів, або понад 7 млн т, які захоронюються на 5,7 тис. сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 8 тис. га [1]. Тільки 80% населення України охоплено послугами з вивезення побутових відходів. В Україні побудовано 34 сміттесортувальні лінії, діє один сміттєспалювальний завод (завод «Енергія», м. Київ) та три сміттєспалювальні установки. Загалом в Україні перероблено та утилізовано близько 9,9% побутових відходів, з них: 1,66% спалено, а 8,24% побутових відходів потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні лінії [1].

Кількість перевантажених сміттєзвалищ становить 163 од. (2,8%), а 693 од. (12,0%) не відповідають нормам екологічної безпеки. З 2 197 сміттєзвалищ, які потребують рекультивации, фактично рекультивовано тільки 258 одиниць [1].

Таким чином, тільки 9,9% побутових відходів відновлюються, а 90,1% відходів захоронюють на полігонах та сміттєзвалищах. Домінуючим способом поводження з побутовими відходами залишається їх захоронення на полігонах та сміттєзвалищах. Внаслідок відсутності дієвої системи поводження з побутовими відходами щороку утворюється понад 27 тис. несанкціонованих сміттєзвалищ [2].

За оцінками RNDА, сектор управління побутовими відходами зазнав значної шкоди внаслідок бойових дій [3]. За оцінками RNDА, загальна сума завданої шкоди станом на серпень 2022 року становить 95 млн доларів США. Знищено 5% від всього парку сміттєвозів України, 9% сортувальних ліній та 17% біогазових установок, що спричинило збій в роботі сектору та матиме довготривалі екологічні наслідки [3]. Особливої шкоди зазнали Луганська та Донецька області.

В той же час, з набуттям чинності Закону України «Про управління відходами» сектор управління побутовими відходами наближається до вимог ЄС у правовому підґрунті [4]. За цільовими показниками, які встановлені в Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року [2], збільшення обсягів відновлення відходів можливо забезпечити за рахунок створення об'єктів інфраструктури з оброблення побутових відходів. Ефективність та технологічна схема нових об'єктів з оброблення відходів суттєво залежить від багатьох чинників, серед яких склад та характеристики побутових відходів в населених пунктах, з яких передбачається вивезення відходів для оброблення. Так, відповідно до вимог ГБН В.2.2-35077234-001 розрахунки кількості та параметрів основних технологічних вузлів, обладнання та об'ємно-планувальних рішень залежать від обсягів та складу побутових відходів, що надходять на підприємство [5]. Техніко-економічні показники майбутнього об'єкта оброблення залежать від розрахунків або припущень про морфологічний склад побутових відходів та його динаміку протягом року.

Робота виконується в рамках реалізації Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 820-р від 8 листопада 2017 року.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час проектування об'єктів оброблення побутових відходів, з метою встановлення техніко-економічних показників, необхідно отримання інформації про склад та обсяги утворення побутових відходів, що зазначено у вимогах ГБН В.2.2-35077234-001 та ДБН А.2.2-3:2014 [5, 6].

В посібнику колективу науковців та фахівців – Барінов М.О., Олексієвець І.Л., Родная Д.В. та інші – приділено увагу практичним аспектам управління відходами та визначено умови використання морфологічного складу. Авторами зазначається необхідність дослідження морфологічного складу на етапі планування системи управління відходами, вплив складу відходів на комплектність та потужність сміттесортувальної лінії, зазначено вплив на вартість будівельних робіт та обслуговування [7].

Дослідження морфологічного складу побутових відходів з метою визначення обсягів біогазу при рекультивациі полігонів побутових відходів та енергетичного потенціалу при спалюванні наведено у роботах [9–14]. Для визначення розрахункових обсягів біогазу важливою складовою є біорозкладна частина побутових відходів: харчові відходи рослинного та

тваринного походження, відходи зелених насаджень, деякі види паперу та відходи деревини, тканини природного походження [9, 12, 13]. Визначення теплотворної здатності побутових відходів та розрахунок кількості теплоти, яку можна отримати від спалювання побутових відходів, здійснюються на основі даних про вологість та морфологічний склад побутових відходів [8]. В багатьох роботах зазначено, що саме біорозкладна частина побутових відходів підвищує вологість та знижує фактичну теплотворну здатність побутових відходів [15–17]. Особлива увага приділяється енергетичному потенціалу побутових відходів шляхом прямого спалювання або отриманням альтернативного палива RDF/SRF в роботах Сігала О., Саф'янца А., Павлюк Н. [15]. Авторами зазначається, що першочерговим джерелом інформації є визначення морфологічного складу відходів.

Застосування параметрів утворення, в тому числі і морфологічного складу побутових відходів, під час регіонального планування системи пропонують у своїх звітах експерти DESPRO [8].

Фракційна характеристика побутових відходів застосовується для більш детального визначення матеріального балансу для підприємств оброблення, відновлення або сортувальних ліній [20].

Методологія визначення морфологічного та фракційного складу побутових відходів

Натурні дослідження з визначення морфологічного складу побутових відходів проводились з урахуванням наказу Міністерства з питань житлово-комунального господарства України від 16.02.10 р. №39 «Про затвердження Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів» та методології дослідження морфологічного складу побутових відходів SWA-Tool (Solid Waste Analysis Tool), яка була розроблена як частина проекту «Інструмент аналізу твердих відходів» Європейської комісії (SWA-Tool).

Дослідження морфологічного складу твердих побутових відходів проводились на господарській ділянці полігону міста Суми. Склад побутових відходів визначався шляхом натурних замірів окремих компонентів.

Під час дослідження побутових відходів, які надходять на полігон, виключено змішування твердих, великогабаритних, ремонтних, промислових та інших відходів.

До виконання дослідження з визначення морфологічного складу побутових відходів залучаються спеціально навчені, підготовлені та проінструктовані працівники (далі – сортувальники). Оптимальна кількість персоналу сортувальної бригади розраховується із середньої швидкості сортування відходів на рівні 6 людино-годин на 100 кілограмів відходів. Інструктаж з методів сортування, техніки безпеки та охорони праці проводиться до початку польових досліджень. Весь персонал, який бере участь у польових дослідженнях, має бути вакцинований від поліомієліту, гепатиту А та гепатиту В. Сортувальники забезпечуються спецодягом та засобами індивідуального захисту.

Сміттевоз вивантажується на майданчику з твердим покриттям. Із загального обсягу побутових відходів, що вивантажені зі сміттевоза, відбираються зразки орієнтовною вагою 150–170 кг.

Сортувальники збирають визначені за класифікацією компоненти побутових відходів у пластикові пакети або контейнери. Компоненти розділяються на складові за матеріалами або маркуванням. Компоненти очищуються від бруду та рідини. Рідини від харчових упаковок враховуються до складу біорозкладних компонентів. Для наповнення пакетів або контейнерів використовують лопати. Після закінчення відбору окремих компонентів у пакети завантажують залишок (фракція ≤ 40 мм), що не піддається сортуванню.

Проводиться почергове зважування компонентів побутових відходів у пластикових пакетах або контейнерах, а також залишку відходів (фракція ≤ 40 мм). Керівник групи сортувальників фіксує вагу для кожного типу матеріалу, відсортованого за визначеною класифікацією, переглядає форму, а потім заносить результати зважування у протокол. Після зважування заповнені зразки видаляють до ділянки складування полігону.

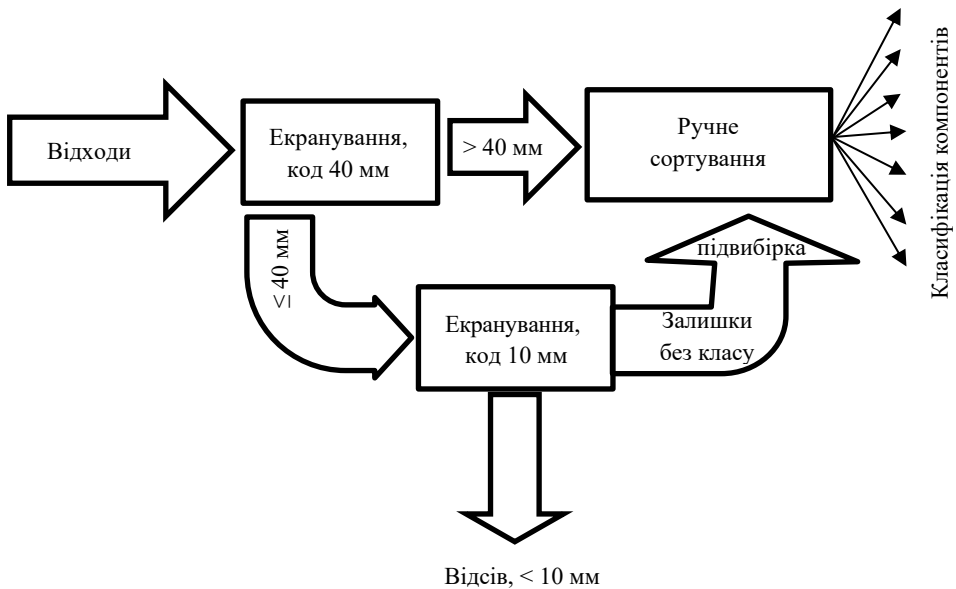


Рис. 1. Процедура сортування

Опрацювання результатів дослідження виконуються у наступному порядку:

- визначають масу кожного відсортованого компонента побутових відходів шляхом підсумовування відповідних даних зважування;
- визначають загальну масу зразка, що була відсортована, шляхом підсумовування усіх даних, одержаних в ході зважування компонентів та їх несортованого залишку (фракція від 10 до 40 мм);
- прийнявши за 100% масу побутових відходів всіх зразків, розраховують відсотковий вміст кожного компонента побутових відходів;
- за загальними даними з усіх зразків шляхом статистичного оброблення визначають похибку серії вимірювань;
- визначають середній морфологічний склад побутових відходів за сумарними показниками всіх зразків.

Відбір нових зразків для дослідження фракційного складу побутових відходів здійснювався аналогічно відбору зразків для досліджень морфологічного складу. Для визначення фракційного складу не використовувались зразки, які відсортовували для визначення морфологічного складу. При дослідженні зразків побутові відходи вручну просівались на семи спеціальних каскадних ситах з квадратними прохідними отворами наступними розмірами: 20x20; 40x40; 60x60; 80x80; 100x100; 150x150; 200x200; 250x250 мм. Розділені фракції зважувались і визначався їх відсотковий вміст за масою. Результати замірів оброблялись стандартними статистичними методами із визначенням показників точності, середніх значень та інтервальною оцінкою.

Визначення матеріального балансу установок механіко-біологічного оброблення побутових відходів

Тверді побутові відходи (ТПВ), які утворюються в населених пунктах Сумської міської територіальної громади, характеризуються як гетерогенна суміш невизначеної кількості предметів, матеріалів, речовин з великим різноманіттям механічних, фізико-хімічних та інших властивостей. Склад цієї суміші є непередбачуваним і носить випадковий характер, оскільки до складу побутових відходів можуть потрапляти різноманітні матеріали, що використовуються в побуті та на виробництві, і водночас він є прогнозованим за основними складовими. Морфологічний склад побутових відходів залежить від містоутворюючих характеристик, пори року, соціально-економічних умов життя населення та його загальноосвітнього і культурного рівнів, рівня матеріального забезпечення, рівня благоустрою житла та побутових умов, технології пакувальних матеріалів і тари, технології та системи оптової та роздрібною торгівлі тощо.

Побутові відходи, які утворюються в населених пунктах Сумської міської територіальної громади, поділяються на три основні групи: змішані побутові відходи (від житлового сектору та невиробничої сфери – адміністративних установ та комерційних закладів); роздільно зібрана вторинна сировина; великогабаритні відходи (ВГВ) та будівельні відходи (БВ), які утворюються в процесі поточного ремонту житла мешканцями.

В таблиці 1 наведено результати натурних польових досліджень із визначення морфологічного складу побутових відходів, які проводили в період 2020–2021 роки на території полігону, розташованого на території с. Великий Бобрик (місце видалення відходів Сумської міської територіальної громади). Було відібрано 12 зразків загальною вагою 1 200 кг за один сезон.

До групи «Біовідходи» входять всі органічні компоненти, які здатні до біологічного розкладу, а саме: харчові відходи рослинного та нерослинного походження (залишки овочів, фруктів, хліб, крупи, сири, м'ясо, риба, корми для тварин та інші), садові та паркові відходи (квіти, трави, листя, бур'яни тощо) та інші відходи (кістки, фекалії тощо). За довідковими даними вологість біовідходів складає 70–90% (за масою). Наявність біовідходів у складі змішаних побутових відходів призводить до утворення фільтрату під час перевезення та захоронення відходів та стає джерелом утворення біогазу на полігоні ТПВ. Пікові зростання вмісту біовідходів протягом року спостерігаються в серпні, вересні та січні; протягом тижня – в суботу, неділю; а також в святкові дні.

До групи «Картон та папір» відносяться глянцеви́й папір, шпалери, газетний папір, фотопапір, мелований папір для копіювання, папір та картон для пакування, гофрована тара, книги, плакати, туалетний папір тощо. При цьому, більше половини об'єму картону та паперу забруднені біорозпадними харчовими відходами, маслами та насичені вологою.

Таблиця 1. Морфологічний склад побутових відходів, які утворюються у Сумській міській територіальній громаді

№	Назва морфологічної групи	Вміст компонентів за морфологічними групами (за масою), %, літній період
1	Біовідходи	44,29
2	Картон та папір	11,82
3	Полімери (пластик, пластмаси)	7,93
4	Скло та кераміка	14,92
5	Чорні та кольорові метали	0,87
6	Текстиль	3,98
7	Небезпечні відходи	3,28
8	Кістки, шкіра, гума	0,75
9	Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів (дрібне будівельне сміття, каміння, вуличний змет тощо)	5,94
10	Відходи електронного та електричного обладнання	1,40
11	Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів	4,82
12	Разом	100,00

До групи «Полімери (пластик та пластмаси)» відносяться наступні найбільш характерні компоненти: PET-пляшки (упаковка), HDPE-контейнери (упаковка), PP-пластик (упаковка) та композитний пластик (сендвіч-упаковка).

До групи «Скло та кераміка» відносяться наступні компоненти: скляні пляшки білі та прозорі; скляні пляшки кольорові; віконне скло; кераміка та інші види скла (термостійке скло, кришталь, лабораторне скло тощо).

До групи «Текстиль» відносяться взуття, текстиль, що не одягається, та одяг, в тому числі частини текстилю: нитки, мотузки, шнури тощо.

До групи «Метали» відносяться чорні та кольорові метали, в тому числі металева тара та упаковка.

До групи «Небезпечні відходи» відносяться наступні компоненти: залишки фарби, відходи транспортних засобів та їх обладнання, відпрацьовані масла, акумулятори, батареї та батарейки, змішані шкідливі побутові засоби (люмінесцентні лампи, ртутні термометри, ліки, шприци, уайт-спирит, фотохімія, клеї, садова та побутова хімія тощо).

До групи «Відходи електронного та електричного обладнання» відносяться велика та мала побутова техніка, комп'ютери та обладнання для телекомунікації, прилади, що містять електричне живлення, або частини цих приладів.

До групи «Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів» входять інертні матеріали, які не піддаються класифікації, та відсів (фракція менше ніж 10 мм).

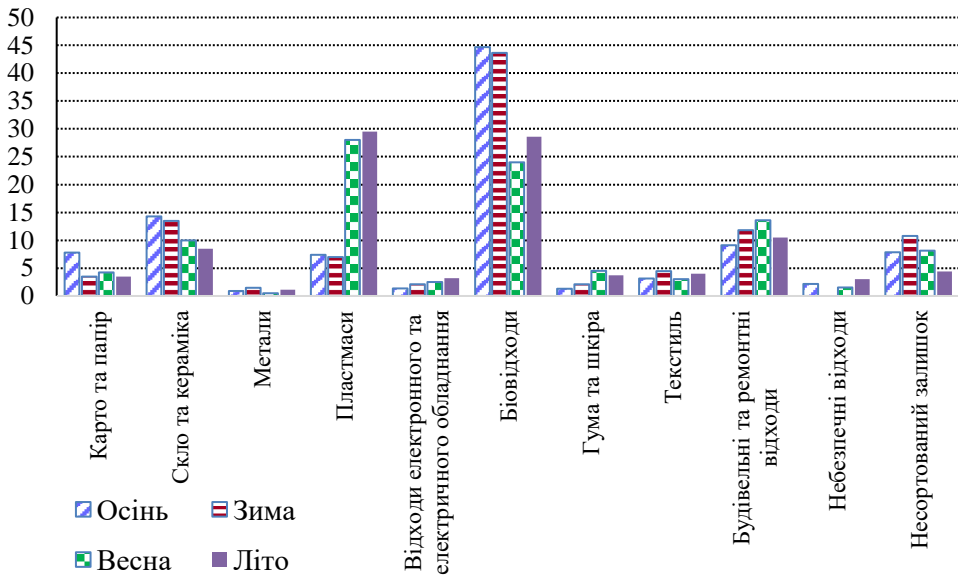


Рис. 2. Морфологічний склад (%) побутових відходів, що утворюються в населених пунктах Сумської області за 2020–2021 рр. (м. Конотоп, м. Шостка та м. Суми)

Динаміка зміни складових протягом року наведена на рис. 2. Так, значним коливанням за вмістом піддаються групи «Полімери», «Біовідходи», «Скло та кераміка» та «Картон та папір».

Фракційний склад побутових відходів, які утворюються в Києві, наведено в таблиці 2. Морфологічний склад відходів міста Київ подібний до складу побутових відходів, які утворюються в місті Суми. Тому застосуємо результати розподілу фракційного складу, визначеного в місті Київ, для результатів морфологічного складу, отриманого в населених пунктах Сумської області.

У наведеній таблиці слід звернути увагу на розподіл відсоткового вмісту за масою на каскадних ситах в сумі до 80 мм, від 80 до 250 мм та більше 250 мм. Ці розміри відповідають основним технологічним етапам на сортувальній лінії, а саме: а) розділення потоку відходів ключом 80 мм в циліндричному барабанному грохоті; б) ручне сортування (відбір вторинної сировини з фракцій більше 80 мм); в) інші автоматизовані процеси сепарації (виробництво RDF/SRF, відбір металів магнітними сепараторами тощо). Сума відсоткового вмісту фракцій до 80 мм (E5) відповідає масам, які розділяються в циліндричних барабанних грохотах «під екран», тобто це важка біорозкладна частина відходів, інертні компоненти тощо, що під дією сил гравітації переміщуються крізь отвори барабанного грохоту діаметром 80 мм. В даному випадку вміст фракції до 80 мм дорівнює 48,43%, з яких 43,48% (K5) – біовідходи та 4,95% (Ж5) – інертний залишок, в тому числі горючі компоненти. Вторинна сировина, яка міститься у фракції до 80 мм, складає 11,22% (D5), більш легка під час сепарації в циліндричному барабанному грохоті переважно залишається «над екраном».

Сума відсоткового вмісту фракцій від 80 до 250 мм (Г10) та більше 250 мм (Г11) відповідає масам, які піддаються ручному сортуванню на сортувальній лінії та подальшій аеробалістичній сепарації. Приблизно половину вторинної сировини при ручному процесі сортування буде відібрано (Г10 + Г11). В даному випадку приймаємо відбір тільки пластику на рівні 7,93% (табл. 1). Більш точно відсоток ручного відбору вторинної сировини можна визначити при визначенні морфологічного складу всіх компонентів вторинної сировини побутових відходів.

Після ручного сортування залишаються горючі компоненти (2Д-фракція для виробництва альтернативного палива RDF/SRF) та фракції більше 250 мм (3Д-фракція). Цей залишок становить приблизно 43,64% (враховано відбір вторинної сировини тільки 7,93% з наявних в таблиці 2).

Таблиця 2. Фракційний склад побутових відходів, які утворюються у Києві (2020 рік)

№ з/п	Розмір фракції, мм	Відсотковий вміст фракції (за масою)				
		Всього	в т.ч. вторсировини	в т.ч. залишок		
				всього	в т.ч. горючі компоненти (без вторсировини)	в т.ч. біовідходів
А	В	Г	Д	Е	Ж	К
1	менше 20	10,36	0,04	10,32	0,38	9,94
2	20...40	14,79	0,26	14,52	0,84	13,68
3	40...60	18,14	2,16	16,03	1,91	14,12
4	60...80	16,32	8,76	7,56	1,82	5,74
5	Разом (до 80)	59,61	11,22	48,43	4,95	43,48
6	80...100	14,78	11,25	3,52	2,01	1,51
7	100...150	10,11	8,87	1,23	0,47	0,76
8	150...200	3,79	3,79	-	-	-
9	200...250	3,56	3,56	-	-	-
10	Разом (від 80 до 250)	32,24	27,47	4,75	2,48	2,27
11	більше 250	8,17	8,17	-	-	-

Механіко-біологічні установки застосовуються до змішаних відходів, які мають високий вміст біовідходів. Змішані відходи піддаються механічним способам сортування, біологічним та ручному сортуванню. Основні концепції механіко-біологічного оброблення різняться між собою послідовністю технологічних операцій та варіантами біологічної обробки. При цьому виробляється висококалорійна фракція або стабілізовані органічні матеріали. Ручне сортування застосовується, якщо змішані відходи містять вторинну сировину, це, як правило, PET-пляшки. Блок ручного сортування може не застосовуватись при налагоджених системах роздільного збирання, якщо вміст вторинної сировини низький. Основними варіантами оброблення біовідходів є: а) компостування, з метою отримання технічного компосту; б) анаеробна ферментація з метою отримання біогазу; в) стабілізація, з метою отримання альтернативного палива.

Спрощена технологічна схема механіко-біологічного оброблення відходів з компостуванням та отриманням RDF/SRF показана на рис. 3. На схемі застосовано розподіл матеріального балансу за основними технологічними напрямками, який сформовано на основі результатів таблиці 2. Вся маса змішаних відходів поступає конвеєром в циліндричний барабанний грохот для екранування. За рахунок вільного просування відходів вздовж по циліндру та його обертів маса відходів розділяється на дві фракції – до 80 мм та більше 80 мм. При подальшому компостуванні також відбувається сепарація готового технічного компосту, при якій відокремлюється інертний відсів та спрямовується на полігон побутових відходів.



Рис. 3. Розподілення балансу відходів на установці механіко-біологічного оброблення

При ручному сортуванні (рис. 3) відбувається відбір кондиційної вторинної сировини (наприклад, забруднені маслом ПЕТ-пляшки або брудний картон не відбирають). Ефективність ручного сортування здебільшого залежить від організації збирання та перевезення побутових відходів. Наявність розвинутої мережі роздільного збирання вторинної сировини знижує ефективність ручного сортування на лініях. Вторинна сировина тюкується та передається на реалізацію для подальшого оброблення.

Після ручного сортування відходи поступають на балістичну аеросепарацію, де відокремлюються легкі горючі фракції (2Д-фракція) від важких матеріалів, таких як склобій, каміння, метали, батарейки, великі за довжиною елементи (3Д-фракція) тощо. Метали та склобій (табл. 1) спрямовуються як вторинна сировина для реалізації, а небезпечні відходи (табл. 1) підлягають передачі на ліцензовані підприємства для знешкодження. 3Д-фракцію та відсів спрямовують для видалення на полігон побутових відходів.

Таким чином, на основі морфологічного та фракційного складу побутових відходів ми визначили розподіл матеріального балансу побутових відходів на прикладі схеми механіко-біологічного оброблення з компостуванням біовідходів.

Висновки і перспективи подальших досліджень

В Україні утворюються великі обсяги побутових відходів, які у 2022 році склали понад 39 млн куб. м або понад 7 млн т. Ця кількість відходів переважно захоронюється на сміттєзвалищах та полігонах. Для збільшення обсягів переробки побутових відходів в Україні необхідно створювати інфраструктуру для оброблення цих відходів. Ефективність таких об'єктів залежить від численних чинників, включаючи склад і характеристики відходів.

Результати дослідження морфологічного та фракційного складу побутових відходів є критично важливими для проектування нових об'єктів оброблення побутових відходів. Ця інформація впливає на техніко-економічні показники підприємства, ефективність виробничих процесів, розрахунок кількості біогазу або компосту та енергетичного потенціалу відходів, а також сприяє раціональному розподілу ресурсів при регіональному плануванні. При цьому важливим є здійснення досліджень морфологічного та фракційного складу побутових відходів за єдиними методичними підходами з прогнозованими величинами точності результатів.

Визначення морфологічного складу побутових відходів, що утворюються в населених пунктах Сумської області, відбувалось в період з 2020 по 2021 р. Для розрахунку матеріального балансу задіяні результати дослідження фракційного складу побутових відходів в Києві у 2020 році. За результатами аналізу розподілу відсоткового вмісту відходів за масою на різних фракціях (до 80 мм, від 80 до 250 мм, більше 250 мм), можна розрахувати кількість відходів, які спрямовуються на різні технологічні етапи оброблення. В дослідженнях акцентується увага на фракції до 80 мм, яка становить приблизно 48,43% та піддається біологічному обробленню, та фракції від 80 мм, яка піддається ручному та механічному сортуванню. На основі морфологічного складу відходів в дослідженнях зроблено припущення, що за допомогою ручного сортування відокремлюється вторинна сировина на рівні 7,93% за масою. Та за рахунок балістичної аеросепарації відокремлюється потенційне альтернативне паливо RDF/SRF, вміст якого складає приблизно 25%. Решта матеріалів у вигляді змету, інертних матеріалів підлягають видаленню на полігоні побутових відходів, а небезпечні відходи, відходи електронного та електричного обладнання підлягають вилученню та передачі ліцензованим підприємствам для знешкодження.

Подальші дослідження будуть спрямовані на побудову технологічних моделей та схем поводження з побутовими відходами з урахуванням п'ятиступеневої ієрархії управління побутовими відходами, за аналогією до існуючих у країнах ЄС. Важливо приділяти увагу цілісному опису схеми на кожному етапі, оскільки загальна ефективність і досяжність цілей Національної стратегії залежить від ефективності кожного етапу збирання, вивезення, оброблення та видалення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналіз стану сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2022 рік. (б. д.). <https://mtu.gov.ua/news/34323.html>
2. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України № 820-р (2020) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-r#Text>
3. Швидка оцінка завданої шкоди та потреб на відновлення – серпень 2022. Київ : Світ. Банк, Уряд України, Європ. Коміс., 2022. 269 с. URL: <https://www.worldbank.org/uk/news/press-release/2023/03/23/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment> (дата звернення: 06.09.2023).
4. Про управління відходами : Закон України від 13.12.2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20/print> (дата звернення: 06.09.2023).
5. ГБН В.2.2-35077234-001:2011 Підприємства сортування та перероблення твердих побутових відходів. Вимоги до технологічного проектування.
6. ДБН А.2.2-3:2014 «Склад та зміст проектної документації на будівництво».
7. Практичні аспекти управління відходами в Україні. Посібник / [Барінов М.О., Олексієв І.Л., Родная Д.В., та ін.] – К. : «Поліграф плюс», 2021. – 118 с.
8. Лазненко Д. Визначення параметрів утворення побутових відходів у населених пунктах України для цілей регіонального планування. Київ : DESPRO, 2019. 9 с. URL: <http://surl.li/tdnz> (дата звернення: 06.09.2023).
9. Інтегроване управління та поводження з твердими побутовими відходами на Вінниччині [Текст] : монографія / під ред. В. Г. Петрука. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2007. – 160 с.
10. Атаєв, С. В. (2017). Дегазація Рівненського полігону твердих побутових відходів. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування* (1).
11. Dvalishvili, N. L., & Tabatadze, M. S. (2019). The influence of municipal solid waste of Georgia on climate changes. In *Waste Management and Resource Efficiency: Proceedings of 6th IconSWM 2016* (pp. 189-194). Springer Singapore.
12. Dimovski, B., Dimitrieska, C., Calamani, S., & Janevska, G. (2023). Mathematical Model for Assessment of Production and Energy Utilization of Landfill Gas in the Pelagonija Region in Republic of N. Macedonia (No. 10142). EasyChair.
13. Milosevic, L. T., Mihajlovic, E. R., Djordjevic, A. V., Protic, M. Z., & Ristic, D. P. (2018). Identification of Fire Hazards Due to Landfill Gas Generation and Emission. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(1).
14. Masebinu, S. O., Akinlabi, E. T., Muzenda, E., Aboyade, A. O., & Mbohwa, C. (2017). Assessing the morphological composition and energy potential of MSW, the case of the city of Johannesburg. In *Proceedings of international conference on industrial engineering and operation management (Morroco)*. IEOM Society International, USA (pp. 5696-5702).
15. Pavliuk, N., Sigal, O., Safiants, A., & Plashykhin, S. (2022). The use of residual municipal solid waste as an alternative fuel. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 15(4), 147-158.
16. Čepić, Z., Bošković, G., Ubavin, D., & Batinić, B. (2022). Waste-to-Energy in Transition Countries: Case Study of Belgrade (Serbia). *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(5).
17. Sidefko, R. (2021). Application of technological processes to create a unitary model for energy recovery from municipal waste. *Energies*, 14(11), 3118.
18. Jędrzszak, A. (2018). Properties of the organic fraction directed to biostabilization in Mbt installations during the heating season. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 65-78.
19. Dronia, W., Połomka, J., & Jędrzszak, A. (2023). Morphological composition of bio-waste collected selectively in towns and villages during autumn and winter. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 73(4), 313-320.

20. Pitak, I., Denafas, G., & Lukošiušė, I. (2020). Analysis MSW fraction after separation with goal to have solid recovery fuel. In Linnaeus ECO-TECH'20: 12th International [digital] conference on establishment of cooperation between companies and institutions in the Nordic countries, the Baltic Sea region and the world 23–25 November 2020, Kalmar: book of abstracts. Linnaeus University.

Стаття надійшла до редакції 14.02.2024 і прийнята до друку після рецензування 17.05.2024

REFERENCES

1. Stan sfery povodzhennja z pobutovymy vidhodamy v Ukraini za 2022 rik. (n. d.). Retrieved from <https://mtu.gov.ua/news/34323.html> [in Ukrainian].
2. Pro shvalennja Nacional'noi' strategii' upravlinnja vidhodamy v Ukraini do 2030 roku. Rozporjadzhennja Kabinetu Ministriv Ukrainy № 820-r (2020) (Ukrai'na). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-r#Text> [in Ukrainian].
3. Shvydka otsinka zavdanoi shkody ta potreb na vidnovlennia – serpen 2022. Kyiv : Cvit. Bank, Uriad Ukrainy, Yevrop. Komis., 2022. 269 s. Retrieved September, 06, 2023 from <https://www.worldbank.org/uk/news/press-release/2023/03/23/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment> [in Ukrainian].
4. Pro upravlinnia vidkhodamy: Zakon Ukrainy vid 13.12.2022 r. Retrieved September, 06, 2023 from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20/print> [in Ukrainian].
5. HBN V.2.2-35077234-001:2011 Pidpriemstva sortuvannia ta pereroblennia tverdykh pobutovykh vidkhodiv. Vymohy do tekhnolohichnoho proektuvannia [in Ukrainian].
6. DBN A.2.2-3:2014 «Sklad ta zmist proektnoi dokumentatsii na budivnytstvo» [in Ukrainian].
7. Barinov, M. O., Oleksiievets, I. L., Rodnaia, D. V. et al. (2021). Praktychni aspekty upravlinnia vidkhodamy v Ukraini [Practical aspects of waste management in Ukraine]. Kyiv: «Polihraf plius» [in Ukrainian].
8. Laznenko, D. (2019). Vyznachennia parametriv utvorennia pobutovykh vidkhodiv u naselenykh punktakh Ukrainy dlia tsilei rehionalnogo planuvannia [Determining the parameters of household waste generation in the settlements of Ukraine for the purposes of regional planning]. Kyiv: DESPRO. Retrieved September, 06, 2023 from <http://surl.li/tdnz> [in Ukrainian].
9. Petruk, V. N. (Ed.). (2007). Intehrovane upravlinnia ta povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy na Vinnychchyni [Integrated management and handling of solid household waste in Vinnytsia region]: monohrafiia. Vinnytsia: Universum-Vinnytsia [in Ukrainian].
10. Ataiev, S. V. (2017). Dehazatsiia Rivnenskoho polihonu tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Degassing of the Rivne solid waste landfill]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia*, (1) [in Ukrainian].
11. Dvalishvili, N. L., & Tabatadze, M. S. (2019). The influence of municipal solid waste of Georgia on climate changes. In *Waste Management and Resource Efficiency: Proceedings of 6th IconSWM 2016* (pp. 189-194). Springer Singapore.
12. Dimovski, B., Dimitrieska, C., Calamani, S., & Janevska, G. (2023). Mathematical Model for Assessment of Production and Energy Utilization of Landfill Gas in the Pelagonija Region in Republic of N. Macedonia (No. 10142). EasyChair.
13. Milosevic, L. T., Mihajlovic, E. R., Djordjevic, A. V., Protic, M. Z., & Ristic, D. P. (2018). Identification of Fire Hazards Due to Landfill Gas Generation and Emission. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(1).
14. Masebinu, S. O., Akinlabi, E. T., Muzenda, E., Aboyade, A. O., & Mbohwa, C. (2017). Assessing the morphological composition and energy potential of MSW, the case of the city of Johannesburg. In *Proceedings of international conference on industrial engineering and operation management (Morroco)*. IEOM Society International, USA (pp. 5696-5702).

15. Pavliuk, N., Sigal, O., Safiants, A., & Plashykhin, S. (2022). The use of residual municipal solid waste as an alternative fuel. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 15(4), 147-158.
16. Ćepić, Z., Bošković, G., Ubavin, D., & Batinić, B. (2022). Waste-to-Energy in Transition Countries: Case Study of Belgrade (Serbia). *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(5).
17. Sidelko, R. (2021). Application of technological processes to create a unitary model for energy recovery from municipal waste. *Energies*, 14(11), 3118.
18. Jędrzak, A. (2018). Properties of the organic fraction directed to biostabilization in Mbt installations during the heating season. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 65-78.
19. Dronia, W., Połomka, J., & Jędrzak, A. (2023). Morphological composition of bio-waste collected selectively in towns and villages during autumn and winter. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 73(4), 313-320.
20. Pitak, I., Denafas, G., & Lukošiuūtė, I. (2020). Analysis MSW fraction after separation with goal to have solid recovery fuel. In *Linnaeus ECO-TECH'20: 12th International [digital] conference on establishment of cooperation between companies and institutions in the Nordic countries, the Baltic Sea region and the world*. 23–25 November 2020, Kalmar: book of abstracts. Linnaeus University.

The article was received 14.02.2024 and was accepted after revision 17.05.2024

Сатін Ігор Валентинович

канд. техн. наук, доцент Київського національного університету будівництва і архітектури, т.в.о. заступника директора Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

Адреса робоча: вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2028-9791> **e-mail:** satin@nikti.org.ua

Романова Тетяна Іванівна

канд. техн. наук, завідувач лабораторії Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

Адреса робоча: вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-8270> **e-mail:** romanova@nikti.org.ua

Панченко Олена Сергіївна

завідувач лабораторії Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

Адреса робоча: вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3680-7036> **e-mail:** panchenko@nikti.org.ua

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

УДК 699.85-026.512.1(045)

Taliat Azizov, Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9621-9805> **e-mail:** taljat999@gmail.com

Vyacheslav Lyulchenko, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6728-4744> **e-mail:** slulchenko@ukr.net

Olga Orlova, Candidate of Technical Sciences, Associate professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4108-950X> **e-mail:** oolga2475@gmail.com

Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman, Ukraine

A PREFABRICATED CIVIL DEFENSE STRUCTURE

Abstract. *To date, there remains a high level of danger of being hit by various types of missiles to the population of Ukraine. Given the requirements of Article 20 of the Civil Protection Code of Ukraine, the obligation of business entities of all forms of ownership to provide their employees with collective protection means is established. According to Article 32 of the Code, in case of putting the unified state civil protection system and its components on high alert, civil protection structures, dual-purpose structures, and simple shelters, regardless of ownership, must be put in place to receive the public within a period not exceeding twenty-four hours. The problem of rapid sheltering of the population can be solved through the use of prefabricated protective structures that will be small in size and can be quickly constructed without the use of heavy machinery.*

The purpose of the study is to develop proposals for the construction of a small-sized civil defense structure that can be built quickly and without the use of heavy machinery, as well as a methodology for calculating the joints of the proposed structure.

The most effective basic ways and means of protecting the population are the use of civil defense structures, but due to lack of funds and control over their maintenance, the protective structures do not meet the established standards. Inspections by state commissions have shown that most of the shelters, anti-radiation, simple and dual-purpose shelters are flooded, the power, water and sewage systems are disconnected, ventilation systems are broken, furniture is missing, etc. And some are used for other purposes. According to Chapter 7 of the Civil Code of Ukraine, civil defense structures include various types of structures, including prefabricated protective structures. Existing risks and threats make it more relevant to install prefabricated civil defense structures that are built (manufactured, assembled) in a short time from special structures (products).

The problem of inventing a prefabricated protective structure for the population that does not require the use of machinery for installation and can be quickly constructed by one team of builders remains a priority area of research. The paper proposes a design of prefabricated elements that can be assembled by hand, and shows a method for calculating the strength of the dressing seams that connect the prefabricated elements. Despite its simplicity, the structure is highly durable and does not require any additional reinforcements, which is a significant advantage over brick structures.

Keywords: *Prefabricated building, protective structure, civil defense.*

Т.Н. Азізов, В.Г. Люльченко, О.М. Орлова

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань, Україна

ШВИДКОСПОРУДЖУВАНА ЗАХИСНА СПОРУДА ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ

***Анотація.** Сьогодні залишається високим рівень небезпеки враження різними типами ракет населення України. У статті 20 Кодексу цивільного захисту України вказано: обов'язок суб'єктів господарювання всіх форм власності – забезпечувати своїх працівників засобами колективного захисту. Відповідно до статті 32 даного Кодексу у разі приведення єдиної державної системи цивільного захисту, її складових у режим підвищеної готовності захисні споруди цивільного захисту, споруди подвійного призначення, найпростіші укриття незалежно від форми власності повинні приводитись у готовність до прийому населення у термін, що не перевищує двадцять чотири години. Реалізувати проблеми, які виникають під час швидкого укриття населення, можна завдяки використанню швидкосторуджуваних захисних споруд, що будуть мати невеликий розмір, швидко встановлюватися без застосування важкої техніки.*

Метою дослідження є розроблення пропозицій із влаштування споруди цивільного захисту невеликих розмірів, яка встановлюється швидко і без застосування важкої техніки, а також методика розрахунку стиків пропонованої споруди.

Найефективнішими способами і засобами захисту населення є використання захисних споруд цивільного захисту, але за відсутності коштів та контролю за підтриманням у належному стані захисні споруди не відповідають встановленим нормам. Перевірки державних комісії встановили, що більшість сховищ, укриттів протирадіаційних, найпростіших та подвійного призначення перебувають у стані затоплення, від'єднані від системи електропостачання, водопостачання і водовідведення, у них зламані вентиляційні системи, відсутні меблі тощо. А деякі використовуються не за призначенням. Відповідно до глави 7 Цивільного кодексу України до захисних споруд цивільного захисту належать різні типи споруд, у тому числі швидкосторуджувани захисні споруди. Ті ризики і загрози, які є, роблять більш актуальною практику встановлення швидкосторуджуваних захисних споруд цивільного захисту, що зводяться (виготовляються, монтуються) за короткий час із спеціальних конструкцій (виробів).

Пріоритетним напрямом досліджень залишається проблема винахідництва швидкосторуджуваних захисних споруд для населення, які не будуть потребувати застосування техніки для монтажу і можуть бути швидко споруджені однією бригадою будівельників. Запропонована конструкція збірних елементів, що монтуються вручну. Показана методика розрахунку міцності перев'язочних швів, які з'єднують збірні елементи. Конструкція має високу міцність і не потребує жодних додаткових підсилень, що є суттєвою перевагою перед цегляними спорудами.

***Ключові слова:** швидкосторуджувана споруда, захисна конструкція, цивільний захист.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.78-87>

Вступ

Відповідно до глави 7 Цивільного кодексу України до захисних споруд цивільного захисту належать різні типи споруд, у тому числі швидкоспоруджувані захисні споруди. Швидкоспоруджувана захисна споруда цивільного захисту – це споруда, що зводиться (виготовляється, монтується) за короткий час із спеціальних конструкцій (виробів), вимоги до яких встановлюються будівельними нормами, стандартами та правилами [6].

Найпростішим укриттям є фортифікаційна споруда, цокольне або підвальне приміщення, інша споруда підземного простору, в якій можливе тимчасове перебування людей із метою зниження комбінованого враження від небезпечних чинників, а також від дії засобів ураження в особливий період.

При застосуванні звичайних засобів ураження захисні споруди повинні захищати від ударної повітряної хвилі та уламків. Це зумовлює необхідність відповідних розрахунків на дію ударної вибухової хвилі, а також розрахунок огорожуючих конструкцій захисних споруд від дії уламків. Існує окремий клас споруд, розрахунок яких виконують на пряме влучання окремих засобів ураження. Це, як правило, спеціалізовані споруди (атомні станції тощо), які мають надважливе значення. Для них виконують додаткові окремі розрахунки. Швидкоспоруджувані захисні споруди не відносяться до такого класу споруд і розраховуються на дію квазістатичного навантаження [2].

Розрахунок огорожуючих конструкцій захисних будівель та споруд на дію ударної вибухової хвилі може бути виконаний методом прямого інтегрування рівнянь руху, методом ударного імпульсу, квазістатичним методом [2, 11, 12]. Відомо, що квазістатичний метод розрахунку є найменш точним, але найбільш доступним для проєктувальників. Тому в нових нормативних документах України [2] прийнято саме такий метод розрахунку. Він передбачає розрахунок міцності огорожуючих конструкцій на дію статичного (умовно) навантаження, яке залежить від класу захисної споруди, її розташування та ін.

Більшість стін підземних та наземних захисних споруд будують із бетонних блоків або монолітного залізобетону [3]. Використання бетонних блоків потребує застосування кранів для монтажу. Крім того, несуча спроможність неармованої стіни на дію горизонтального навантаження, яке може досягати великих значень [3], дуже низька. Застосування монолітного залізобетону потребує використання доволі дорогої опалубки, є достатньо трудомістким і потребує великого часу (для твердіння бетону) до його використання. Застосування кам'яної кладки також потребує додаткового підсилення за допомогою шару армованого бетону та інших способів укріплення. Існують швидкоспоруджувані захисні конструкції [10], які виготовляються з П-подібних залізобетонних рам. Відомі модульні захисні споруди [5, 7, 9]. Однак усі названі об'єкти потребують обов'язкового застосування кранової техніки. Монтаж споруди за допомогою даної техніки ускладнює процес влаштування захисної будівлі. В умовах військового стану часто постає завдання: спорудження невеликих об'єктів для захисту населення, які б були споруджені швидко і без застосування важкої техніки, яка не завжди є доступною. Такі конструкції можуть бути тимчасовими, розібраними та перевезеними в інше місце. Їх перевага в простоті, невисокій вартості та можливості швидкого спорудження без застосування техніки.

Метою дослідження є розроблення пропозицій із влаштування споруди цивільного захисту невеликих розмірів, яку встановлюють швидко і без застосування важкої техніки, а також методики розрахунку стиків пропонованої конструкції.

Методи дослідження (Methods). Для розрахунку використовується багатофункціональний програмний комплекс, призначений для проектування і розрахунку машинобудівних та будівельних конструкцій різного призначення – LIRA-SAPR. Застосовані методи будівельної механіки для розрахунку несучої здатності пропонованих конструкцій. Створення розрахункової схеми монтажу збірних елементів на перетині двох стін здійснювалося безпосередньо із архітектурної 3D- і 2D-моделі.

Результати дослідження

Влаштування стін споруд зі штучних елементів потребує, як було сказано вище, додаткового підсилення через відсутність можливості сприймати згинальні моменти неармованою конструкцією. Натомість пропонується використання збірних залізобетонних елементів, які можна виготовляти на заводах залізобетонних виробів і монтувати вручну на будівельному майданчику. Монтаж збірних елементів виконується як кладка цегляної стіни. На відміну від монтажу стінових панелей, пропонований елемент монтується в положенні «лежачи», тобто він укладається один на інший по товщині t і на всю висоту стіни h .

Для спорудження стін прямокутного в плані приміщення з розмірами L_1 та L_2 достатньо використовувати чотири типорозміри блоків, які відрізнятимуться довжиною. Якщо приміщення квадратне в плані, то кількість типорозмірів блоків два. Це пов'язано з фактом, що в кутах приміщення слід влаштовувати перев'язку блоків перпендикулярного напрямку. При більшій, ніж довжина одного збірного елемента, довжині стіни збірні елементи укладаються з перев'язкою.

На рис. 1 показаний приклад фрагменту споруди, який по довжині складається з двох збірних елементів.

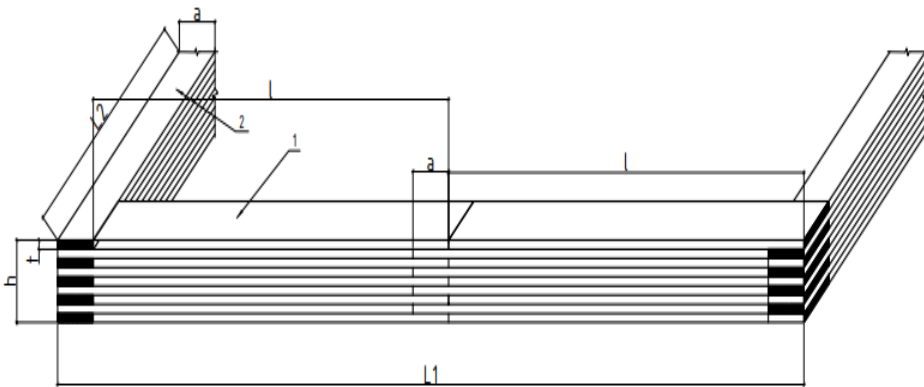


Рис. 1. Схема монтажу збірних елементів на перетині двох стін

Якщо позначити через L_1 та L_2 довжини сторін споруди у взаємоперпендикулярному напрямку, то будемо мати такі типорозміри збірних елементів по довжині l та по ширині l_p :

$$l = L_1 / n_1 - a; l_p = L_2 / n_2 - a, \quad (1)$$

де n_1, n_2 – кількість збірних елементів в напрямку відповідно L_1 та L_2 ; a – ширина збірного елемента.

По висоті споруди h кількість елементів визначається їх товщиною t з врахуванням шва з цементного розчину між ними.

Укладка (монтаж) збірних елементів виконується з перев'язкою (див. рис. 1) аналогічно укладці цегли при влаштуванні цегляної стіни. Однак, на відміну від цегляної стіни, така конструкція може сприймати доволі великі згинальні моменти в горизонтальному напрямку.

Довжина l збірного елемента може бути рівною довжині захисного приміщення. Товщина t та ширина a елемента підбирається за умови можливості монтування вручну, тобто за умови накладення обмежень на вагу елемента.

Армування стіни у вертикальному напрямку не потрібне, тому що весь згинальний момент від дії горизонтальних сил будуть сприймати елементи в горизонтальній площині, а в цих елементах є своя робоча арматура.

Ширину a елемента (яка є товщиною стіни) слід підбирати з розрахунку несучої здатності на дію згинального моменту від горизонтального навантаження, а також з розрахунку на пробивання осколками фугасних снарядів. Робоча арматура збірного елемента також підбирається з розрахунку несучої здатності на дію згинального моменту в горизонтальному напрямку. Розрахунок несучої здатності збірного залізобетонного елемента виконується за нормативними документами [3, 4].

Розглянемо несучу здатність стіни з пропонованих збірних елементів. Згідно з [2] розрахунку, квазістатичне навантаження на стіну дорівнює 100 кН/м^2 . Нехай довжина поздовжньої стіни L_1 дорівнює 6 м, висота стіни $h = 2.5$ м (цілком достатньо для маленької захисної споруди швидкого монтування). Також товщина збірного елемента складає $t = 40$ мм, а його ширина $a = 350$ мм (рекомендована товщина стіни [2]). Тоді розподілене навантаження на один елемент буде дорівнювати $q = 100 \cdot 0.04 = 4 \text{ кН/м}$. Із врахуванням ширини елемента розрахунковий прогин стіни на згин буде $L = 5.65$ м. Максимальний згинальний момент $M_{max} = q \cdot L^2 / 8 = 15.96 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

Армування елемента слід прийняти симетричним через те, що навантаження може мати різні знаки, і максимальний момент може бути як позитивним, так і негативним. Поперечний переріз збірного елемента з армуванням показаний на рис. 2.

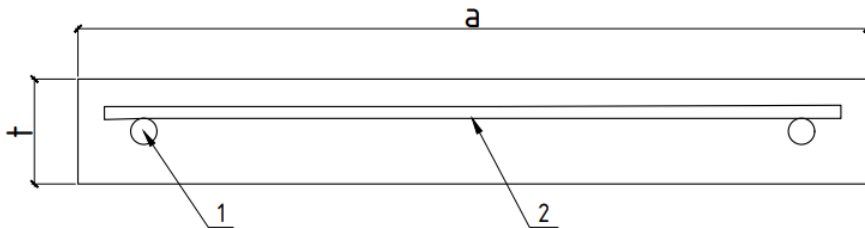


Рис. 2. Поперечний переріз збірного елемента:

1 – поздовжня (робоча) арматура; 2 – поперечна (конструктивна) арматура

Якщо прийняти величину захисного шару 25 мм, то плече внутрішньої пари Z_s дорівнюватиме $350 - 2 \cdot 25 = 300$ мм. Зусилля на один стрижень арматури дорівнює $15.96 / 0.3 = 53.2$ кН. Для сприйняття такого зусилля цілком достатньо арматури діаметром 12 мм класу А500.

Слід відзначити, що такий розрахунок зроблено з досить великим запасом, тому що стіну слід розраховувати як плиту, опертю по контуру, про що буде сказано нижче. Але такий розрахунок зроблено, щоб показати, що армування збірних елементів досить просте.

Більш складним завданням є розрахунок монолітного шва між збірними елементами в зоні стику. На рис. 3 показано вузол стику двох збірних елементів. Враховуючи, що розмір стику a невеликий, вважаємо величину згинального моменту постійною. Зі сторони балки справа (балка 2 на рис. 3, а) діє згинальний момент M_2 ; зі сторони балки зліва – момент M_1 (рис. 3, б). Шов між збірними балками знаходиться під дією чистого кручення моментами M_1 та M_2 . Тобто згинальні моменти M_1 та M_2 в збірних елементах є крутним моментом M_t для шва. Переріз умовного стрижня (шва між збірними елементами) має розміри axh , де a – довжина шва, h – його висота, яка дорівнює висоті поперечного перерізу збірних елементів (див. рис. 3, б).

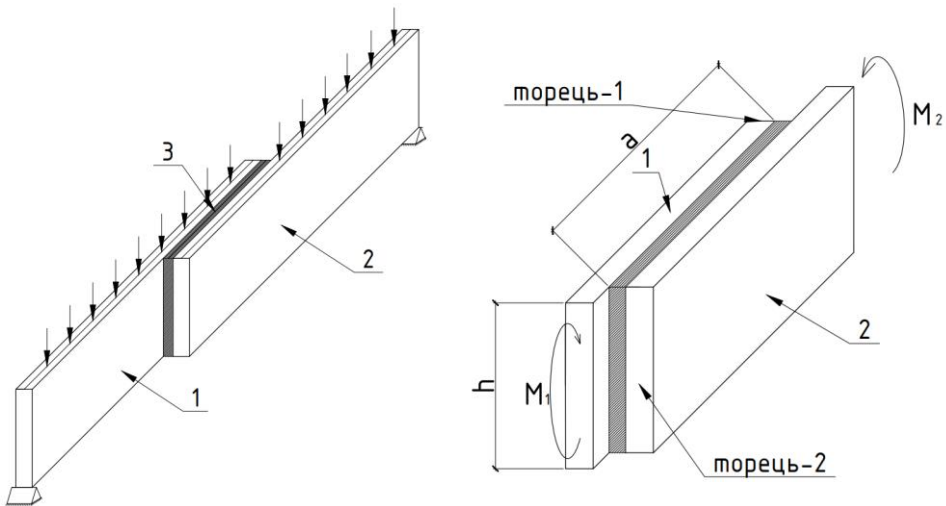


Рис. 3. Схема з'єднання елементів (а); схема дії зусиль в стикі двох збірних елементів (б)

З курсу опору матеріалів [8] відомо, що максимальні дотичні напруження, які діють по довшій стороні прямокутного перерізу, дорівнюють:

$$\tau_{\max} = \frac{M_t}{W_t}, \quad (2)$$

де W_t – момент опору перерізу при крученні, що визначається за формулою [6]:

$$W_t = \alpha \cdot b^2 \cdot d, \quad (3)$$

де b , d – відповідно менша та більша сторони прямокутного перерізу; α – коефіцієнт, що залежить від відношення d/b і дається в будь-якому довіднику з опору матеріалів [8].

Максимальні дотичні напруження на короткій стороні τ_{short} отримаємо, помножуючи τ_{max} за (2) на коефіцієнт γ , який також залежить від відношення d/b і дається в довідниках з опору матеріалів. Однак, у запас міцності можна визначати лише максимальні дотичні напруження τ_{max} .

Якщо в розглянутому вище прикладі $b = d = 35$ см, то будемо мати $\alpha = 0.208$ і момент опору при крученні $W_t = 0.208 \cdot 35^2 \cdot 35 = 8918$ см³. Максимальне дотичне напруження при $M_t = 15.96$ кН·м (див. вище) складатиме $\tau_{max} = 15.96 \cdot 100 / 8918 = 0.179$ кН/см² = 1.79 МПа.

Відомо, що максимальне напруження зрізу дорівнює приблизно двократному опору бетону на розтягнення. Тому потрібне значення опору на розтягнення складає 0.89 МПа, що менше, ніж характеристичне значення опору бетону доволі низького класу С12/15 [3]. Таким чином, такий стик витримає вказане навантаження.

Слід відзначити, що розглянутий розрахунок іде в запас міцності, тому що монолітний шов не тільки в місці стику двох збірних елементів, як це показано на рис. 3, а й на всій довжині.

Розглянемо тепер розрахунок несучої здатності у вертикальному напрямку. Розрахункова схема виглядає, як показано на рис. 4, а. Тобто це схема плити, яка оберта по контуру. Сторони, паралельні осі X – це фундамент і перекриття; сторони, паралельні осі Y – це поперечні стіни. На рис. 4, б показаний поперечний переріз стіни січенням, паралельним осі Y .

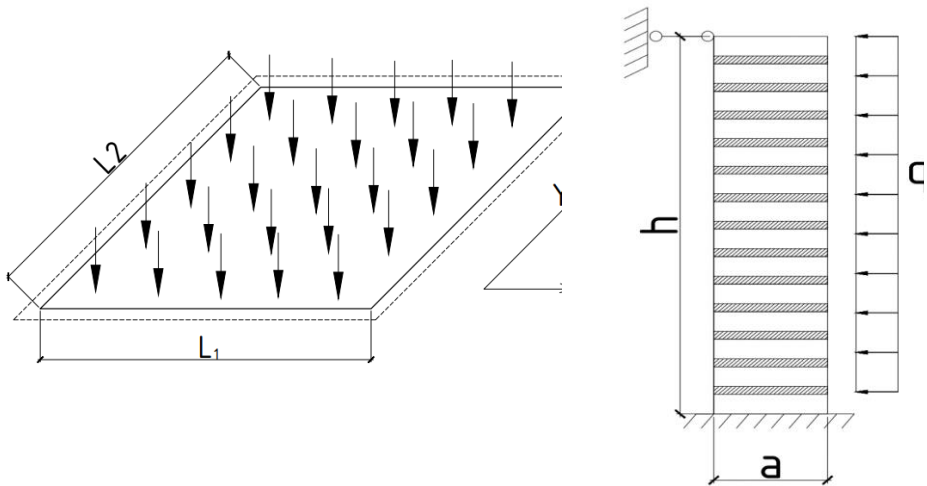


Рис. 4. До розрахунку стіни: а) – розрахункова схема плити, обертої по контуру; б) – спрощена схема до розрахунку у вертикальному напрямку

На рис. 4 штриховими лініями умовно показане шарнірне опирання плити, яка в даному випадку моделює стіну захисної споруди. Сторона L_1 – умовно фундамент споруди; сторона, паралельна L_1 – перекриття; сторони, паралельні осі Y – торцеві стіни (стіни перпендикулярного напрямку). Збірні

залізобетонні елементи укладені вздовж осі X , і в цьому напрямку елементи мають армування, яке визначене вище. У напрямку осі Y (в напрямку висоти стіни h) стіна не має армування. Поперечний переріз стіни в напрямку висоти показаний на рис. 4, б. На рис. 4 в'язь вверху стіни є в'язю, яка моделює перекриття, що для вертикальної стіни є горизонтальною опорою.

Розрахунком у будь-якій програмі (наприклад, у відомій програмі LIRA-SAPR) українського виробництва легко визначити згинальні моменти M_x та M_y в плиті за рис. 4, а. Максимальний згинальний момент $M_{y,max}$ (по висоті стіни) для плити розміром 2.5×4 м при навантаженні 100 кН/м^2 складає $53 \text{ кН} \cdot \text{см/см}$. Момент опору стіни товщиною $a = 35$ см (див. рис. 4, б) і шириною $b = 1$ см з урахуванням пластичних деформацій дорівнює $W = b \cdot a^2 / 3.5 = 350 \text{ см}^3$. Тоді максимальне нормальне напруження $\sigma_{max} = M_{y,max} / W = 150 \text{ Н/см}^2$. Цілком достатньо прийняти бетон класу С 16/20 [3].

При більшій величині горизонтального навантаження можна збільшити товщину стіни a (висоту перерізу збірних елементів) або передбачити армування по вертикалі в отворах збірних елементах, які також можна передбачити при їх виготовленні. Крім того, при влаштуванні такої споруди під рівнем землі навантаження зменшується. При цьому принцип влаштування споруди і розрахунок її несучої здатності не змінюється.

Пропонована конструкція з точки зору монтажу не відрізняється від звичайної кам'яної кладки, але має суттєву різницю і перевагу з точки зору роботи конструкції стіни на згин. Неармована цегляна кладка може витримати доволі малі згинальні моменти. Конструкція ж з пропонованих збірних блоків має достатню несучу здатність і в залежності від армування може бути розрахована на будь-які величини навантаження.

Крім того, перекриття захисної споруди теж може бути виконаним із таких же збірних елементів, поставлених на ребро. Таким чином, коли є декілька типорозмірів збірних елементів, можна споруджувати стіни та перекриття швидко, без застосування підйомно-транспортної техніки.

При інших розмірах поперечного перерізу і довжині елемента розрахунок несучої здатності не відрізняється від прийнятого.

Маса одного збірного елемента не велика. Так, при довжині елемента 3 м, його ширині 0.35 м і товщині 40 мм, маса буде складати 92 кг, що цілком прийнятне для монтажу двома робітниками.

Можна також зменшити довжину збірного елемента для зменшення його ваги. При цьому міцність стику (див. рис. 3) буде забезпечена.

Проповану споруду досить легко влаштовувати не тільки на поверхні землі, а й розташовувати її під землею, у задалегідь викопаному котловані. Влаштування отворів виконується з використанням скорочених по довжині збірних елементів.

Таким чином, пропонована конструкція відрізняється можливістю швидкого спорудження без застосування техніки. На відміну від цегляної кладки, збірні елементи вже мають свою арматуру, збірні залізобетонні елементи мають значно більшу міцність, ніж цегла. Крім цього, перекриття захисної споруди також влаштовується з тих самих збірних елементів, що робить її універсальною.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Під час повномасштабного вторгнення росії в Україну постає питання можливості швидкого спорудження невеличких захисних споруд. У статті запропонована швидкоспоруджувана захисна споруда, яка не потребує застосування техніки для монтажу і може бути швидко споруджена однією бригадою будівельників. Запропонована конструкція збірних елементів, що монтуються вручну, показана методика розрахунку міцності перев'язочних швів, які з'єднують збірні елементи. Через простоту конструкція має високу міцність і не потребує жодних додаткових підсилень, що є суттєвою перевагою перед цегляними об'єктами.

У перспективі передбачається дослідження застосування клейових розчинів для збільшення адгезії шва між збірними елементами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.2.5-97. Захисні споруди цивільної оборони. [Чинний від 1998-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1998. 82 с. (Інформація та документація).
2. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. [Чинний від 2023-11-01]. Вид. офіц. Київ, 2023. 123 с. (Інформація та документація).
3. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будівель і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинний від 2011-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2011. 75 с. (Інформація та документація).
4. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 2010-12-28]. Вид. офіц. Київ, 2011. 172 с. (Інформація та документація).
5. Захисні споруди модульного типу. URL: <https://kharkivoda.gov.ua/news/124525> (дата звернення: 18.03.2024).
6. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI : станом на 31 березня 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення: 10.09.2023).
7. Нове укриття за декілька днів. URL: <https://dozorro.org/blog/nove-ukrittva-za-dekilka-dniv-yak-na-prozorro-kupyut-modulni-shovisha> (дата звернення: 18.03.2024).
8. Опір матеріалів : підручник / Г.С. Писаренко та ін. Київ : Вища школа, 2004. 655 с.
9. Швидкоспоруджувані броньовані захисні споруди цивільного захисту модульного типу класу В R7. URL: <https://hitek.kiev.ua/ua/Shvydkosporudzhuvani-bronovani-zakhysni-sporudy> (дата звернення: 14.03.2024).
10. Швидкоспоруджувана захисна споруда (на 22 особи). URL: <https://bkbm.ua/mobile-bombeshovyshe-22> (дата звернення: 15.09.2023).
11. Unified Facilities Criteria (2008), "UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency.
12. Kingery C. N., Bulmash G., (1984) "Technical report ARBRL-TR-02555: Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst", AD-B082 713, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.

Стаття надійшла до редакції 23.01.2024 і прийнята до друку після рецензування 29.04.2024

REFERENCES

1. DBN V.2.2.5-97. Zakhysni sporudy tsyvilnoi oborony. [Chynnyi vid 1998-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv, 1998. 82 s. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
2. DBN V.2.2-5:2023. Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu. [Chynnyi vid 2023-11-01]. Vyd. ofits. Kyiv, 2023. 123 s. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
3. DBN V.2.6-98:2009. Konstruktsii budivel i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia. [Chynnyi vid 2011-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv, 2011. 75 s. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
4. DSTU B V.2.6-156:2010. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia. [Chynnyi vid 2010-12-28]. Vyd. ofits. Kyiv, 2011. 172 s. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
5. Protective structures of modular type. Retrieved 18.03.2024 from <https://kharkivoda.gov.ua/news/124525> [in Ukrainian].
6. Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy : Zakon Ukrainy vid 02.10.2012 r. № 5403-VI : stanom na 31 bereznia 2023 r. Retrieved 10.09.2023 from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> [in Ukrainian].
7. A new shelter in a few days. Retrieved 18.03.2024 from <https://dozorro.org/blog/nove-ukrityta-za-dekilka-dniv-yak-na-prozorro-kupuyut-modulni-shovisha> [in Ukrainian].
8. Pysarenko, H.S. et al. (2004). Opir materialiv. Kyiv: Vyscha shkola [in Ukrainian].
9. Prefabricated armoured civil defence structures of modular type of class B R7. Retrieved 14.03.2024 from <https://hitek.kiev.ua/ua/Shvydkosporudzhuvani-bronovani-zakhysni-sporudy> [in Ukrainian].
10. Shvydkosporudzhuvana zakhysna sporuda (na 22 osoby). Retrieved 15.09.2023 from <https://bkbm.ua/mobilne-bombeshovyshe-22> [in Ukrainian].
11. Unified Facilities Criteria. (2008). “UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions“, U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency.
12. Kingery, C.N., Bulmash, G. (1984). “Technical report ARBRL-TR-02555: Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst“, AD-B082 713, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.

The article was received 23.01.2024 and was accepted after revision 29.04.2024

Азізов Талят Нуредінович

доктор технічних наук, професор кафедри техніко-технологічних дисциплін, охорони праці та безпеки життєдіяльності, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань, Україна

Адреса робоча: 20300 Україна, м. Умань, вул. Садова, 2

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9621-9805> **e-mail:** taljat999@gmail.com

Люльченко Вячеслав Григорович

кандидат педагогічних наук, доцент кафедри техніко-технологічних дисциплін, охорони праці та безпеки життєдіяльності, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань, Україна

Адреса робоча: 20300 Україна, м. Умань, вул. Садова, 2

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6728-4744> **e-mail:** slulchenko@ukr.net

Орлова Ольга Михайлівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри техніко-технологічних дисциплін, охорони праці та безпеки життєдіяльності, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, м. Умань, Україна

Адреса робоча: 20300 Україна, м. Умань, вул. Садова, 2

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4108-950X> **e-mail:** oolga2475@gmail.com

УДК: 621.791.75

Oleg Levchenko¹, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of the Labour Protection, Industrial and Civil Safety

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

Yury Polukarov¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety

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

Olga Bezushko², Candidate of Technical Sciences, Senior Scientist

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6148-1675> **e-mail:** ola.bezushko@gmail.com

Olga Goncharova², Candidate of Technical Sciences, Head of the laboratory

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5213-6300> **e-mail:** goncharova.olga789@gmail.com

Olena Zemlyanska¹, Senior lecturer of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety

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

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, Kyiv, Ukraine

HYGIENIC ASSESSMENT OF MAGNETIC FIELDS IN DIFFERENT METHODS OF ARC WELDING

Abstract. *The purpose of the work was to determine the hygienic characteristics of electromagnetic fields created by various methods of electric arc welding. For this purpose, an analysis of literature data on the electromagnetic safety of electric arc welding was performed. The levels and spectral composition of magnetic fields created by arc welding equipment in various ways were determined in order to assess their impact on the health of the welders. A description of the proposed methodical approaches to determining the level of magnetic fields, means of measuring them, and methods of assessing their impact on the welder's health is given. Modern regulations regarding the assessment of electromagnetic field effects on humans are characterized, as well as their difference from the regulations that were in force until recently. It is shown that new publications about the harmfulness of electromagnetic fields when using electrical production equipment began to appear. Therefore, there was a need to conduct new studies of electromagnetic fields, in particular their magnetic component (magnetic field strength, A/m) when using welding equipment. This is necessary for the hygienic assessment of magnetic fields and the development of appropriate methods and means of protection for welders. To do this, it was necessary to select new generation devices for determining the intensity of magnetic fields created by welding equipment. Based on the analysis of the obtained oscillograms and spectrograms of the magnetic fields, their levels were evaluated when using different methods of arc welding. It is shown that the spectral composition of the magnetic field signal is mainly determined by the welding method itself, the characteristics of the arc combustion and the nature of the transfer of the electrode metal in the arc gap, as well as the initial parameters of the welding arc power sources.*

Key words: *arc welding, electromagnetic field, field strength, oscillograms, spectrograms, protection of welders.*

О.Г. Левченко¹, Ю.О. Полукаров¹, О.М. Безушко², О.М. Гончарова²,
О.В. Землянська¹

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

ГІГІЄНІЧНА ОЦІНКА МАГНІТНИХ ПОЛІВ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

***Анотація.** Мета роботи полягала у визначенні гігієнічних характеристик електромагнітних полів, що створюються різними способами електродугового зварювання. Для цього виконано аналіз літературних даних щодо електромагнітної безпеки електродугового зварювання. Визначено рівні та спектральний склад магнітних полів, що створюються обладнанням дугового зварювання різними способами, з метою оцінювання їх впливу на організм зварників. Наведено опис запропонованих методичних підходів до визначення рівнів магнітних полів, засобів їх вимірювань та методів оцінки їх впливу на організм зварника. Охарактеризовано сучасні нормативи щодо оцінки дії електромагнітного поля на людину, їх відмінність від нормативів, що діяли до останнього часу. Показано, що почали з'являться нові публікації про шкідливість електромагнітних полів при використанні електричного виробничого обладнання. Тому виникла необхідність у проведенні нових досліджень електромагнітних полів, зокрема їх магнітної складової (напруженості магнітного поля, А/м) при використанні зварювального обладнання. Це необхідно для гігієнічного оцінювання магнітних полів та розроблення відповідних методів і засобів захисту зварників. Для цього необхідно було вибрати прилади нового покоління для визначення напруженості магнітних полів, що створюються саме зварювальним обладнанням. На основі аналізу отриманих осцилограм та спектрограм магнітних полів виконана оцінка їх рівнів при застосуванні різних способів дугового зварювання. Показано, що спектральний склад сигналу магнітного поля визначається, переважно, самим способом зварювання, особливостями електродугового процесу і характером переносу електродного металу в дуговому проміжку, а також вихідними параметрами джерел живлення зварювальної дуги.*

***Ключові слова:** дугове зварювання, електромагнітне поле, напруженість поля, осцилограми, спектрограми, захист зварників.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.88-101>

Вступ

Постановка завдання. Процеси електродугового зварювання все ширше застосовуються у виробництві зварних конструкцій, будівництві, машинобудуванні тощо. Проте разом з позитивними властивостями даний високопродуктивний технологічний процес має й певні недоліки — застосування електричного й електронного зварювального обладнання зазвичай супроводжується генеруванням підвищених рівнів електромагнітних випромінювань [1, 2]. За певних умов ці випромінювання можуть бути шкідливими і, у деяких випадках, небезпечними для організму зварників. Тому особлива увага має бути приділена питанням електромагнітної безпеки зварювального обладнання, дії електромагнітних полів (ЕМП) на людину [3–5], а також створенню відповідних заходів та засобів захисту від них.

Особливої уваги потребують невирішені питання шкідливого та небезпечного впливу ЕМП на організм зварника [1], оскільки саме зварники – це одна з груп робітників, які піддаються дії ЕМП великої інтенсивності, особливо, коли вони розташовуються близько до зварювального обладнання і при прямому контакті кабелів з їх тілом [2, 6]. У залежності від способу зварювання, виду зварювального обладнання і відстані до нього робітника рівні магнітної складової ЕМП, тобто напруженість магнітних полів (МП), можуть перевищувати гранично допустимі рівні і бути небезпечними для організму людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними джерелами МП є сильно навантажені ланцюги, а особливо зварювальний контур. Амплітудне значення напруженості МП на робочому місці зварника залежить від виду і сили зварювального струму, розмірів і форми зварювального контуру, а також від відстані між робочим і джерелом поля [7]. Робота електричного обладнання для дугового зварювання супроводжується генеруванням МП високих рівнів, переважно, у наднижньому діапазоні частот [6]. Це створює певну небезпеку для зварників. Так, у роботі [2] представлено результати вимірювань рівнів МП на робочому місці при напівавтоматичному зварюванні металевим електродом в активному газі відповідно до діючої європейської Директиви 2013/35/ЄС [3]. Отримані результати рівнів МП у смузі частот від 5 Гц до 400 кГц показали, що вони суттєво перевищують рівні МП, що створюються іншими видами електричного обладнання. Це пояснюється тим, що при дуговому зварюванні застосовуються відносно високі електричні струми (до кількох сотень ампер). У [2] для досліджень впливу МП на зварника вимірювали його рівень на робочих місцях за допомогою трьохосового магнітометра Холла, прикріпленого до зап'ястя руки зварника, тобто у найближчому положенні до джерела МП (біля кабелю джерела струму). Результати вимірювань показали, що магнітна індукція МП у цій точці становила 1,49 мТл, що дещо нижче гранично допустимого рівня (ГДР) за нормативами ДСН 3.36.096-2002 [8] (1,75 мТл для восьмигодинної робочої зміни).

Слід зауважити, що старі санітарні норми [9], що діяли до 2002 року, регламентували МП лише на частоті 50 Гц. Нові ж українські норми [8] враховують весь діапазон частот, характерний для зварювальних процесів, і всі необхідні чинники: частоту, напруженість і час дії МП на організм людини. Це дає можливість дати об'єктивну гігієнічну оцінку їх впливу на організм людини.

Попередні публікації про МП були отримані за застарілими методиками і не дають адекватного уявлення про дію МП. Зараз почали з'являтися деякі нові публікації про шкідливість ЕМП при використанні побутової техніки і відсутні дані про ЕМП при зварюванні. Це пояснюється відсутністю відповідних приладів, які б дозволили фіксувати рівні магнітного поля, характерні саме для зварювального обладнання (не на рівні мкТл, а, переважно, на рівні мТл). Тому виникла необхідність у проведенні нових досліджень МП (напруженості магнітного поля, А/м) при використанні як існуючого, так і нового зварювального обладнання. Причому такі дослідження необхідно виконати в широких діапазонах частот на робочих місцях при застосуванні різних видів зварювання. При цьому слід врахувати вплив на рівень і частоту МП особливостей способів зварювання, відстані робочого місця зварника до джерела МП і час його перебування в зоні небезпечної дії. Такі дані необхідні для розроблення методів і засобів захисту від МП.

Мета дослідження – визначення напруженості магнітних полів при різних способах дугового зварювання для їх гігієнічного оцінювання у відповідності з новими нормативами.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- визначити оптимальні умови проведення експериментів щодо визначення напруженості МП, що створюються зварювальним обладнанням;
- дати гігієнічну оцінку МП у відповідності з новими нормативами для подальшого розроблення рекомендацій із захисту зварників від МП.

Методика дослідження

Оцінка параметрів МП на робочому місці зварників виконувалась у такій послідовності:

- визначення зони можливого знаходження працюючого біля електричного обладнання під час проходження зварювального струму,
- виділення в цій зоні точок, максимально наближених до джерела МП,
- визначення частотних діапазонів випромінювань і вимірювання напруженості МП в цих точках і діапазонах,
- визначення часових характеристик МП.

Вимірювання напруженості МП при дугових методах зварювання повинні проводитися з урахуванням розміщення електричного кабелю.

Для вимірювання напруженості МП використовували виносний датчик (перетворювач магнітного поля), інтегруючий RC-ланцюг і реєструючий пристрій, в якості якого використовували цифровий запам'ятовуючий осцилограф з функцією швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) з блоком розширення. Застосовували такі прилади:

- датчик магнітного поля ДМП-1 (Україна),
- вимірювач індукції магнітного поля ГФІ-1 (Україна),
- вимірювач індукції магнітного поля ТП2-2У-01 (Україна),
- осцилограф PCS-500 з ПК (Velleman, Бельгія),
- осцилограф цифровий запам'ятовуючий ТДС 1002 (Tektronix, США).

У процесі вимірювань напруженості МП датчик вносили в поле, що досліджувалось, і орієнтували в просторі по максимуму показів реєструючого приладу. Виконували три виміри у вигляді коротких імпульсів з великим періодом тривалості. При цьому датчик розташовується послідовно в трьох взаємно перпендикулярних площинах і реєстрували його показання в кожній площині. Амплітудне значення вектора напруженості МП визначали за формулою [8]:

$$H_m = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}, \quad (1)$$

де H_x, H_y, H_z – значення напруженості МП в кожній площині.

Сумарне значення магнітного поля H визначали за виразом [8]:

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}, \quad (2)$$

де H_n – напруженість магнітного поля окремої гармоніки.

Тривалість опромінення працюючих в період зміни визначали шляхом проведення хронометражних спостережень. Сума всього часу, затраченого на виконання зварювання, показує час опромінення протягом дня.

Досліди виконувались у зварювальних лабораторіях Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона на типових робочих місцях. Вимірювання напруженості МП проводилися при ручних, автоматичних і напівавтоматичних способах дугового зварювання при застосуванні постійного та змінного струму. На робочій поверхні металевого стола встановлювались деталі для зварювання. Розташування зварювального обладнання (джерела живлення, баластних реостатів, сталених газових балонів тощо) було незалежно-оптимальним. У зв'язку з вільним розташуванням джерел живлення і баластних реостатів зварювальні кабелі також мали вільне положення в просторі і відносно зварника.

Основною задачею вимірювання напруженості МП є порівняння її з сучасними санітарними нормами [8]. При цьому розсіювання МП від джерел живлення, магнітні наводки від сусідніх постів і вплив феромагнітних мас на цьому етапі досліджень не мали принципового значення. Це обумовлено тим, що при ручному зварюванні рівень МП, що індукується на поверхні різних частин тіла зварника та всередині, визначається переважно величиною зварювального струму. Крім того, на рівень МП суттєво впливає площа випромінюючого контуру, розташування зварників відносно основних джерел випромінювання і відстань від випромінювача до тіла зварника.

Схема розташування зон, в яких проводилися вимірювання при ручному і напівавтоматичному зварюванні, представлена на рис. 1.

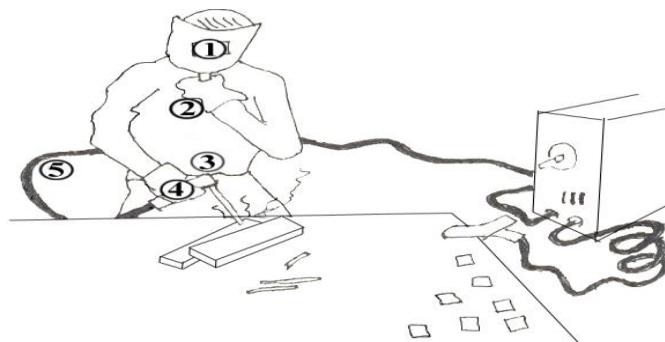


Рис. 1. Схема розташування зон вимірювання напруженості магнітного поля: 1 – голова (лоб), 2 – груди, 3 – живіт, 4 – кисть, 5 – кабель

Наведений опис умов проведення дослідів дозволяє коректно виміряти рівні МП у всіх чутливих точках організму людини, які можуть піддаватись небезпечній та шкідливій дії МП. До таких точок, переважно, належать точки позначені на рис. 1: 1 – головний мозок, 2 – серце й легені (груди), 3 – сечостатеві органи (живіт), 4 – кисть руки. Оскільки електричний кабель може дотикатись до тіла зварника, на ньому також необхідно визначати напруженість МП.

Оцінка отриманих результатів вимірювань напруженості МП виконувалась шляхом їх порівняння з гранично допустимими рівнями (ГДР) [8], для чого необхідно було знати час знаходження (експозиції) зварника в цих полях. Для цього проводили хронометраж конкретного технологічного процесу, який міг

бути здійсненим в реальних умовах промислового виробництва. Проте, раніше виконані дослідження зайнятості зварників показують, що дія МП на організм носить перервний характер. Так, персонал ручного дугового зварювання в цілому протягом восьмигодинної робочої зміни знаходиться в зоні несприятливої дії МП не більше двох годин, що обумовлено необхідністю виконання підготовчих робіт і коефіцієнтом тривалості увімкнення зварювального обладнання (ПВ, %). Зазвичай для обладнання ручного дугового і напівавтоматичного зварювання він складає 20...60% від п'ятихвилинного циклу роботи.

Отже, якщо прийняти за чистий час зварювання 2 години за зміну, значення нормованих параметрів згідно із санітарними нормами будуть мати такі значення (табл. 1).

Таблиця 1. Вимоги до рівнів магнітного поля згідно з ДСН 3.3.6.096-2002 [8]

Параметри	Граничні амплітудні значення в спектральних діапазонах		
	0–5, Гц	5–50, Гц	0,05–1,0, кГц
$E_{H_{гд}}, (A/м)^2 \cdot год$	$1,4 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^7$	70000
$H_{гд}, (A/м) на 2 год$	11832	2828	187

Примітка: $H_{гд} = \sqrt{\frac{E_{H_{гд}}}{T}}$, де $E_{H_{гд}}$ – гранично допустиме значення енергетичного навантаження протягом робочого дня, T – час дії, год.

Такі умови виконання експериментальних замірів напруженості МП, тобто чистий час зварювання, що становить 2 години за зміну, дозволяє об'єктивно визначити реальні значення ГДР МП.

Результати дослідження

Виконано визначення напруженості МП, отриманих під час дугового зварювання різними способами (автоматичному зварюванні під флюсом, ручному покритими електродами, напівавтоматичному в захисних газах) електричним струмом промислової частоти (50 Гц) та постійним струмом. Умови проведення експериментів (способи зварювання, марка зварювальних матеріалів та обладнання, режими зварювання), а також результати визначення напруженості МП наведено в табл. 2–5.

Напруженість МП при автоматичному зварюванні під флюсом з використанням тиристорного трансформатора з фазовим управлінням ТДФ-1002 визначалась методом аналізу осцилограми та спектрограми, отриманих за допомогою зазначених приладів. Вимірювання проводились на відстані 0,5 м від осі зварювального мундштука автомата ТС-17. Магнітне поле, індуковане зварювальним струмом, на екрані осцилографа візуально сприймається як синусоїдальне (рис. 2). Однак, його дискретний спектр (рис. 3) характеризується як вираженою переважно правою гармонікою з частотою 50 Гц (H_{m50}), що досягає максимальної величини в ділянці живота зварника $H_{m50}=360$ А/м, так і гармоніками $H_{m100}=180$ А/м і $H_{m150}=150$ А/м. Отримані результати вимірювань (табл. 2) порівнювали з нормативними величинами МП.

Таким чином, визначення рівнів МП при автоматичному зварюванні на змінному струмі під флюсом на середньому за потужністю режимі показало задовільні в гігієнічному відношенні результати (табл. 2). Із результатів таблиці видно, що перевищень ГДР МП в усіх досліджених діапазонах частот не виявлено.

При цьому було враховано, що оператор автоматичного зварювання не зобов'язаний постійно знаходитись в зоні впливу МП, тобто може захищатись відстанню від зварювального обладнання, мінімізуючи шкідливу дію МП на організм.

Діюче значення магнітного поля H , підраховане за виразом (2), становить 404 А/м, що значно нижче регламентованих (1400 А/м).

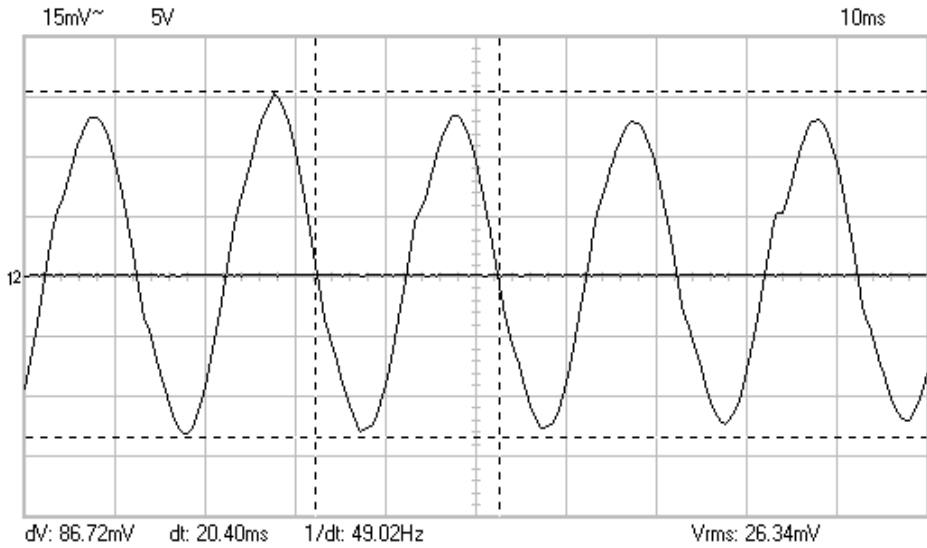


Рис. 2. Осцилограма магнітного поля автоматичного дугового зварювання під флюсом

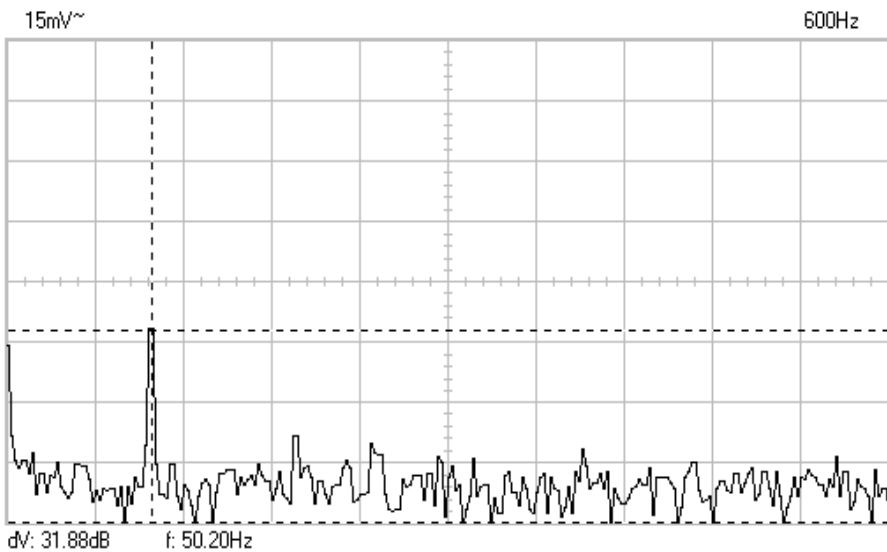


Рис. 3. Спектрограма магнітного поля автоматичного дугового зварювання під флюсом

Таблиця 2. Результати визначення напруженості магнітного поля при автоматичному дуговому зварюванні під флюсом АН-65, діаметр дроту – 4,0 мм, автомат ТС-17, джерело струму – трансформатор ТДФ-1002, струм – змінний 700 А, 36 В

Діапазони частот, Гц	Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м				
	Зони вимірювань				
	1 (лоб)	2 (груди)	3 (живіт)	4 (кисть)	5 (кабель)
0–5	$H_5=83$	$H_5=130$	$H_5=230$	*	*
5–50	$H_{50}=12$	$H_{50}=210$	$H_{50}=360$	*	*
50–1000	$H_{100}=62$	$H_{100}=98$ $H_{150}=70$ $H_{200}=48$	$H_{100}=180$ $H_{150}=150$	*	*

Примітка: * – у даному діапазоні частот сигналу магнітного поля не виявлено

Подальша перевірка згідно з ДСН 3.3.6.096-2002 складається з перевірки балансу енергетичного навантаження за діапазонами частот і перевищення норми в діапазоні 0-1000 Гц за виразом [8]:

$$\sum H_n^2 / \text{ГДР}^2 \leq 1, \quad (3)$$

де ГДР – гранично допустимі рівні МП відповідних діапазонів.

Так, для найбільших напруженостей МП, у даному випадку в ділянці живота зварника, при двогодинній експозиції величина співвідношення (3) більша одиниці. Отже, у цій зоні при автоматичному дуговому зварюванні під флюсом є перевищення допустимих значень напруженості МП, що вимагає застосовувати заходи захисту зварника (в даному випадку оператора автоматичного зварювання).

Перевищення допустимого рівня МП у розглянутому випадку обумовлене несинусоїдальною формою зварювального струму та наявністю у спектрі другої і третьої гармонік МП $H_{m100}=180$ А/м та $H_{m150}=150$ А/м.

Зрозуміло, що в цьому випадку для оператора-зварника немає необхідності знаходитись в зазначеній зоні і можна застосувати так званий “захист відстанню”. В інших випадках, наприклад для ручного та напівавтоматичного зварювання, питання захисту зварника від МП буде складнішим.

Аналогічним чином було виконано аналіз осцилограм і спектрограм, характерних для інших способів дугового зварювання (табл. 3–5).

Результати досліджень рівнів МП (табл. 3) при ручному дуговому зварюванні покритими електродами марки АНО-21 на оптимальному режимі показали, що в частотному діапазоні 0–5 Гц перевищень нормованих рівнів МП немає. У частотному діапазоні 5–50 Гц перевищень також немає: усі значення напруженості МП нижчі ГДР двогодинної і навіть восьмигодинної експозиції. Але напруженість МП біля самого кабелю (струмоводу), який з’єднує випрямляч зварювального струму ВДУ-506 з електродотримачем, в частотному діапазоні 0–5 Гц по всій довжині кабелю становить 3977 А/м. Тобто напруженість у цій зоні майже досягає ГДР (4200 А/м). А у діапазоні частот 50–1000 Гц, для якого ГДР становить 94 А/м для восьмигодинної

робочої зміни, виявлено окремі гармоніки $H_{300}=896$ А/м та $H_{600}=179$ А/м, які значно перевищують ГДР. Це свідчить про те, що якщо зварник знаходиться близько біля кабелю (обмотує його навколо свого тіла або намотує на руку, якою тримає електрод), це буде небезпечно для його здоров'я.

Таблиця 3. Результати визначення напруженості магнітного поля при ручному дуговому зварюванні електродами АНО-21, діаметр електродів – 4,0 мм, джерело струму – випрямляч ВДУ-506, струм – постійний 200...220 А, 32...34 В

Діапазони частот, Гц	Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м				
	Зони вимірювань				
	1 (лоб)	2 (груди)	3 (живіт)	4 (кисть)	5 (кабель)
0–5	$H_5=397$	$H_5=658$	$H_5=2386$	$H_5=1531$	$H_5=3977$
5–50	$H_{50}=28$	$H_{50}=40$	$H_{25}=283$ $H_{50}=159$	$H_{50}=113$	$H_{25}=253$
50–1000	$H_{150}=20$ $H_{300}=32$ $H_{600}=15$	$H_{100}=49$ $H_{150}=64$ $H_{250}=31$ $H_{300}=82$ $H_{450}=15$	$H_{100}=127$ $H_{300}=710$ $H_{400}=113$ $H_{500}=113$	$H_{100}=50$ $H_{300}=357$ $H_{500}=43$	$H_{100}=90$ $H_{150}=56$ $H_{200}=63$ $H_{300}=896$ $H_{350}=23$ $H_{400}=25$ $H_{425}=15$ $H_{500}=21$ $H_{600}=179$

Дослідження напруженості МП (табл. 4) при напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі дротом Св-08Г2С показали, що в усіх досліджених зонах тіла зварника є перевищення ГДР МП в частотному діапазоні 50–1000 Гц.

Наявність такої великої кількості гармонік у цьому частотному діапазоні можна пояснити впливом на форму сигналу МП характеристик самого способу зварювання. Зокрема, на форму сигналу МП впливають особливості горіння дуги, характер переносу електродного металу в дуговому проміжку і, звичайно ж, вихідні параметри джерела живлення зварювальної дуги. Процес зварювання може характеризуватись наявністю коротких замикань дугового проміжку, розміром крапель розплавленого металу та іншими факторами [10], які впливають на частоту створюваного МП.

Результати визначення напруженості МП, що створюється при ручному аргонодуговому зварюванні сталі неплавким електродом в аргоні з використанням випрямляча струму MAGIC WAVE-3000 (Австрія), наведено в таблиці 5. Ці результати свідчать про повну відсутність перевищень рівня МП в усіх діапазонах частот і зонах тіла зварника. Це можна пояснити поліпшеними електричними характеристиками зазначеного сучасного випрямляча струму з модуляцією зварювального струму.

Таблиця 4. Результати визначення напруженості магнітного поля при напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі, дріт Св-08Г2С, діаметр – 1,2 мм, джерело струму – випрямляч ВДГ-33, струм – постійний 220 А, 20...22 В

Діапазони частот, Гц	Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м				
	Зони вимірювань				
	1 (лоб)	2 (груди)	3 (живіт)	4 (кисть)	5 (кабель)
0–5	$H_5=477$	$H_5=560$	$H_5=1193$	$H_5=768$	*
5–50	*	$H_{46}=356$	$H_{46}=450$	$H_{20}=127$ $H_{40}=318$	*
50–1000	$H_{75}=318$ $H_{200}=202$ $H_{300}=126$ $H_{400}=51$ $H_{480}=63$ $H_{600}=32$	$H_{66}=226$ $H_{80}=253$ $H_{210}=224$ $H_{232}=126$ $H_{266}=89$ $H_{276}=63$ $H_{300}=561$ $H_{350}=80$	$H_{56}=450$ $H_{114}=316$ $H_{134}=201$ $H_{158}=201$ $H_{178}=201$ $H_{184}=201$ $H_{222}=201$ $H_{300}=201$	$H_{60}=357$ $H_{120}=253$ $H_{186}=253$ $H_{216}=143$ $H_{242}=113$ $H_{276}=113$ $H_{300}=159$ $H_{350}=127$ $H_{400}=63$ $H_{462}=71$ $H_{520}=51$	*

Примітка: * – у даному діапазоні частот сигналу магнітного поля не виявлено

Таблиця 5. Результати визначення напруженості магнітного поля при ручному дуговому зварюванні неплавким електродом в аргоні, діаметр електрода – 3,0 мм, джерело струму – випрямляч MAGIC WAVE-3000 (Австрія), струм – постійний 100 А, 10 В

Діапазони частот, Гц	Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м				
	Зони вимірювань				
	1 (лоб)	2 (груди)	3 (живіт)	4 (кисть)	5 (кабель)
0–5	$H_5=416$	$H_5=310$	$H_5=636$	$H_5=1081$	*
5–50	$H_{25}=33$	*	$H_{40}=21$	$H_{40}=39$	*
50–1000	$H_{85}=45$ $H_{100}=35$ $H_{115}=45$ $H_{295}=20$	*	$H_{95}=29$ $H_{160}=29$ $H_{270}=40$ $H_{320}=80$	$H_{95}=49$ $H_{160}=51$ $H_{290}=71$ $H_{320}=160$ $H_{550}=41$	*

Примітка: * – у даному діапазоні частот сигналу магнітного поля не виявлено

Разом з тим, наявність у зоні кисті руки, якою зварник тримає електрод (рис. 1), сигналу МП в частотному діапазоні 50–1000 Гц величиною 160 А/м ($H_{320}=160$) не означає, що є перевищення ГДР. Це пояснюється тим, що згідно із санітарними нормами у випадку локальної дії МП на кисті рук використовується підвищувальний коефіцієнт:

$$H_{гд\ лок} = 5H_{гд\ заг}, \quad (4)$$

де $H_{гд\ лок}$ – ГДР змінного магнітного поля з частотою 50 Гц при локальній дії (кисті рук), $H_{гд\ заг}$ – ГДР змінного магнітного поля при загальній дії [8].

Тому перевищень ГДР у даному випадку немає: ця гармоніка знаходиться значно нижче допустимого рівня 470 А/м, що нижче ГДР. Отже, для ручного аргонодугового зварювання на постійному струмі перевищень нормованих значень МП немає навіть при восьмигодинній експозиції.

Низькі рівні МП у цьому випадку пояснюються використанням постійного струму невеликої сили та низької напруги дуги, а також особливостями випрямляча струму MAGIC WAVE-3000.

Разом з тим, у цих дослідях ручне зварювання неплавким електродом в аргоні виконувалось без присаджувального дроту. В інших же дослідях при подачі присадки в дуговий проміжок за рахунок хвильових процесів можлива додаткова модуляція сигналу МП і ускладнення (за кількістю гармонік) його спектра.

Отримані результати свідчать про те, що при напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі металевим електродом на робочому місці зварника створюються МП, які перевищують ГДР в частотному діапазоні 50–1000 Гц. Це обумовлено, переважно, наявністю у складі індукованих МП досить інтенсивних високочастотних (у порівнянні з частотою 50 Гц) гармонічних сигналів, оскільки норма МП у цьому діапазоні частот згідно з регламентом [8] різко зменшується (стає більш жорсткою) приблизно в 15 разів.

Для спектра всіх досліджених зварювальних процесів характерна наявність у сигналах МП складових з основними (першими) гармоніками 20, 50, 60, 300 Гц гармонік, кратних основним частотам і комбінаційним частотам. Походження цих гармонік при дуговому зварюванні можна пояснити наступними особливостями процесу зварювання:

20–25 Гц – це частота короткого замикання дугового проміжку, що виникає під час зварювання металевим електродом у вуглекислому газі;

50 Гц – частота напруги мережі, що живить зварювальний трансформатор, випрямляч, інвертор тощо;

60 Гц – частота напруги у вторинному контурі зарубіжних джерел живлення дуги (наприклад MAGIC WAVE-2600);

300 Гц – частота першої гармоніки змінної складової випрямленої напруги при використанні шестифазної схеми випрямлення змінного струму.

Слід також врахувати вплив на форму МП наявності присаджувального дроту в усіх наших дослідях, окрім ручного зварювання неплавким електродом в аргоні, який сприяє додатковій модуляції сигналу МП і ускладнює його спектр.

Аналізуючи закономірності перебігу зварювальних процесів, стає зрозумілим, що спектральний склад сигналу МП, генерованих зварювальним обладнанням, переважно, визначається двома принципово нероздільними факторами:

– самим способом зварювання, особливостями електродугового процесу і характером переносу електродного металу в дуговому проміжку;

– вихідними параметрами джерел живлення зварювальної дуги: трансформаторів, випрямлячів, а також додатковими електричними пристроями, що входять в зварювальний ланцюг (дросель, конденсатори, стабілізатори, осцилятори, «пристрої запалення дуги», баластні реостати тощо).

Природно, що для розробників електричного зварювального обладнання найбільший інтерес являє шлях зниження інтенсивності вищих гармонік за рахунок зменшення впливу другого фактору. Тому, з міркувань електромагнітної безпеки, розробникам такого обладнання слід зменшити крутизну фронту нарощування імпульсів струму і напруги джерел живлення зварювальної дуги, що працюють у ключових режимах. У процесі проектування джерел живлення необхідно знаходити компромісні рішення, вибираючи деякі оптимальні значення робочої частоти перетворювальних пристроїв і форму імпульсів зварювального струму. Що стосується впливу самих способів ручного та напівавтоматичного зварювання на частотний спектр і інтенсивність МП в робочій зоні, на нашу думку, потрібно:

– постійно обмежувати застосування процесів з короткими замиканнями дугового проміжку і ширше застосовувати зварювання в сумішах газів ($Ar + CO_2$, $Ar + O_2$, $Ar + O_2 + CO_2$) дротами малих діаметрів, що забезпечить відсутність цих замикань;

– розглянути (з гігієнічних позицій) можливість застосування способів зварювання і наплавлення з модуляцією режиму зварювання з метою отримання більш стабільного і передбачуваного процесу генерації МП;

– застосовувати автоматизацію та роботизацію зварювальних процесів.

Висновки

Результати гігієнічної оцінки магнітних полів у відповідності з новими нормативами полягають у наступному:

– напівавтоматичне зварювання металевим електродом у вуглекислому газі характеризується перевищенням гранично допустимого рівня магнітного поля в частотному діапазоні 50–1000 Гц;

– при автоматичному дуговому зварюванні під флюсом перевищення гранично допустимих рівнів окремих гармонік магнітного поля відсутні, але є перевищення сумарного значення усіх гармонічних складових магнітного поля;

– ручне дугове зварювання постійним струмом неплавким електродом в аргоні характеризується помірним рівнем магнітного поля на робочому місці;

– під час ручного дугового зварювання покритими електродами перевищений рівень магнітного поля має місце лише на самому електродному кабелі.

Для мінімізації шкідливої дії магнітних полів на зварників слід керуватись наступними рекомендаціями:

– збільшити відстань тіла зварника від джерела електричної енергії і зварювального обладнання;

– не давати можливості електродному чи зворотному кабелю обвиватися навколо тіла працюючого;

– не давати можливості тілу зварника знаходитися між електродним кабелем і будь-яким іншим електричним кабелем; усі кабелі необхідно тримати разом з одної чи другої сторони.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Račaiová, H., Oravec, M., Šmelko, M., Lipovský, P., & Forraj, F. (2018). Extra low frequency magnetic fields of welding machines and personal safety. *Journal of electrical engineering*, 69(6), 493-496. URL: <https://sciendo.com/pdf/10.2478/jee-2018-0084>.

2. Michałowska, J., Przystupa, K., & Krupski, P. (2020). Empirical assessment of the MAG welder's exposure to an electromagnetic field. *Przegląd Elektrotechniczny*, 96. <https://doi.org/10.15199/48.2020.12.48>.
3. Modenese, A., & Gobba, F. (2021). Occupational Exposure to Electromagnetic Fields and Health Surveillance according to the European Directive 2013/35/EU. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1730. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041730>.
4. Stam, R. (2018). Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields). Publication of the National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands. URL: <https://rivm.openrepository.com/bitstream/handle/10029/623629/2018998.pdf?sequence=1>.
5. Fuentes, M. A., Trakic, A., Wilson, S. J., & Crozier, S. (2008). Analysis and measurements of magnetic field exposures for healthcare workers in selected MR environments. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55(4), 1355-1364. <https://doi.org/10.1109/TBME.2007.913410>.
6. Yamaguchi-Sekino, S., Ojima, J., Sekino, M., Hojo, M., Saito, H., & Okuno, T. (2011). Measuring exposed magnetic fields of welders in working time. *Industrial health*, 49(3), 274-279. <https://doi.org/10.2486/indhealth.MS1269>.
7. Levchenko, O., Polukarov, Y., Goncharova, O., Bezushko, O., Arlamov, O., & Zemlyanska, O. (2022). Determining patterns in the generation of magnetic fields when using different arc welding techniques. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (116)), 50–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254471>.
8. Напруженість електромагнітних полів промислової частоти. (2002). ДСН 3.3.6.096-2002. Київ: МОЗ, 16. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text>.
9. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц. (1986). Москва: № 3206-85 от 17.01.85, 7. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200031592>.
10. Потапьевский А. Г. (2007). Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах. Издание 2-е, переработанное. Киев, *Экотехнология*, 192. URL: <https://themechanic.ru/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=13675>.

Стаття надійшла до редакції 30.01.2024 і прийнята до друку після рецензування 09.05.2024

REFERENCES

1. Pačaiová, H., Oravec, M., Šmelko, M., Lipovský, P., & Forraj, F. (2018). Extra low frequency magnetic fields of welding machines and personal safety. *Journal of electrical engineering*, 69(6), 493-496. URL: <https://sciendo.com/pdf/10.2478/jee-2018-0084>
2. Michałowska, J., Przystupa, K., & Krupski, P. (2020). Empirical assessment of the MAG welder's exposure to an electromagnetic field. *Przegląd Elektrotechniczny*, 96. <https://doi.org/10.15199/48.2020.12.48>
3. Modenese, A., & Gobba, F. (2021). Occupational Exposure to Electromagnetic Fields and Health Surveillance according to the European Directive 2013/35/EU. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1730. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041730>
4. Stam, R. (2018). Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields). Publication of the National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands. URL: <https://rivm.openrepository.com/bitstream/handle/10029/623629/2018998.pdf?sequence=1>
5. Fuentes, M. A., Trakic, A., Wilson, S. J., & Crozier, S. (2008). Analysis and measurements of magnetic field exposures for healthcare workers in selected MR environments. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55(4), 1355-1364. <https://doi.org/10.1109/TBME.2007.913410>

6. Yamaguchi-Sekino, S., Ojima, J., Sekino, M., Hojo, M., Saito, H., & Okuno, T. (2011). Measuring exposed magnetic fields of welders in working time. *Industrial health*, 49(3), 274-279. <https://doi.org/10.2486/indhealth.MS1269>
7. Levchenko, O., Polukarov, Y., Goncharova, O., Bezushko, O., Arlamov, O., & Zemlyanska, O. (2022). Determining patterns in the generation of magnetic fields when using different arc welding techniques. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (116)), 50–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254471>
8. Napruzhenist' elektromagnitnykh poliv promyslovoi chastoty [The intensity of electromagnetic fields of industrial frequency]. (2002). DSN 3.3.6.096-2002. Kyiv: MOZ, 16. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text> [in Ukrainian].
9. Predelno dopustimye urovni magnitnykh poley chastotoy 50 Hz. [Maximum permissible levels of magnetic fields with a frequency of 50 Hz]. (1986). № 3206-85 from 17th January 1985. Moscow, 7. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200031592> [in Russian].
10. Potapievskiy, A. G. (2007). Svarka v zaschitnykh gazakh plavyaschimsya elektrodom. Chast' 1. Svarka v aktivnykh gazakh. Izdanie 2-e, pererabotannoe. Kiev, *Ekotekhnologiya*, 192. URL: <https://themechanic.ru/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=13675> [in Russian].

The article was received 30.01.2024 and was accepted after revision 09.05.2024

Левченко Олег Григорович

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

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

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

Полукаров Юрій Олексійович

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

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

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

Безушко Ольга Миколаївна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Адреса робоча: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6148-1675> **e-mail:** ola.bezushko@gmail.com

Гончарова Ольга Миколаївна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Адреса робоча: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5213-6300> **e-mail:** goncharova.olga789@gmail.com

Землянська Олена Василівна

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

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

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

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 502.3/7

Oleksandr Trofymchuk¹, Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of NASU, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space

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

Oleksandr Hordiienko¹, Junior Researcher of the Department of natural resources

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4891-3410> **e-mail:** gordiienko.ov@gmail.com

Yevheniia Anpilova^{1,2}, PhD, Senior Researcher of the ¹Department of natural resources; ²Department Computational Hydrosystems

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4107-0617> **e-mail:** yevheniia.anpilova@ufz.de

Yevhenii Yakovliev¹, Dr.Sc., Chief Researcher of the Department of environment research

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

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space, National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²UFZ-Helmholtz Centre for Environmental Research, Permoserstr., Leipzig, Germany

MONITORING VERTICAL LANDSLIDES IN THE SOLOTVYNO AGLOMERATION USING SENTINEL-1 SATELLITE IMAGERY

Abstract. *The Synthetic Aperture Radar (SAR) equipped Sentinel-1 satellites are a valuable source of Earth observation data. They provide a spatial resolution of 10 to 20 metres, depending on the imaging mode. Unlike optical sensors, SAR radars can operate day and night, in cloudy weather and in the absence of sunlight. This makes them a reliable source of data in all conditions. Google Earth Engine (GEE), in turn, includes dual-polarisation Sentinel-1 data in its large and up-to-date archive. Since GEE does not have a single lookup complex (SLC) that allows standard methods to investigate changes in terrain, the authors set out to build a model based on the Random Forest (RF) machine learning library built into GEE that would be well suited to detecting natural and anthropogenic changes in the gypsometric structure of the terrain.*

In this article we analyse Sentinel-1 satellite radar images and automatically obtain data on the location of significant relief changes. Our research area is the natural and anthropogenic zones covering the agglomeration of the village of Solotvyno and the fields of flooded salt mines with active development of karst forms and areas with vertical relief shifts. Maps and graphs of changes and deformations in the agglomeration of Solotvyno were prepared on the basis of satellite radar images.

The authors developed a Random Forest machine learning algorithm to detect local vertical displacements of the earth's surface, which has advantages over other algorithms and is data-free (SLC). The algorithm is based on the classification of the earth's surface and identifies well the areas where relief displacements are filled with water, and allows to increase the accuracy of the assessment of hazardous areas of surface deformations (landscapes) in the area of residential, industrial, recreational facilities, important critical infrastructure.

Keywords: remote sensing, SAR, relief deformation, natural and anthropogenic changes, monitoring, environmental protection.

О.М. Трофимчук¹, О.В. Гордієнко¹, Є.С. Анпілова^{1,2}, Є.О. Яковлев¹

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

²Центр екологічних досліджень ім. Гельмгольца, Лейпциг, Німеччина

МОНІТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗСУВІВ У СОЛОТВИНСЬКІЙ АГЛОМЕРАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ SENTINEL-1

Анотація. Супутники Sentinel-1, обладнані радіолокаційними системами із синтезованою апертурою (РСА), є цінним джерелом даних для спостереження за Землею. Вони забезпечують просторову роздільну здатність від 10 до 20 метрів, залежно від режиму зйомки. На відміну від оптичних сенсорів, радіолокатори РСА можуть працювати вдень і вночі, а також за хмарної погоди та відсутності сонячного світла. Це робить їх надійним джерелом даних у будь-яких умовах. В свою чергу, Google Earth Engine (GEE) містить дані Sentinel-1 у подвійній поляризації у своєму великому та актуальному архіві. Оскільки у GEE відсутній комплекс з єдиним пошуком (SLC), що дозволяє стандартними методами досліджувати зміни у рельєфі, авторами було поставлено за мету побудувати модель, на основі бібліотеки машинного навчання Random Forest (RF), вбудованої в GEE, яка б добре працювала для виявлення природних і антропогенних змін у гіпсометричній структурі рельєфу.

У цій статті проаналізовано супутникові радіолокаційні знімки Sentinel-1 та автоматично отримано дані про місцезнаходження помітних змін рельєфу. Територією наших досліджень є природно-техногенні зони, що охоплюють агломерацію селища Солотвино та поля затоплених соляних шахт з активним розвитком карстових форм та ділянками, в яких спостерігаються вертикальні зсуви рельєфу. На основі супутникових радіолокаційних знімків побудовано карти та графіки змін та деформацій на території Солотвинської агломерації.

Авторами розроблено алгоритм на основі машинного навчання Random Forest для виявлення локальних вертикальних зміщень земної поверхні, що має переваги над іншими алгоритмами та полягає в тому, що він не потребує обробки даних (SLC). Алгоритм базується на класифікації земної поверхні та добре ідентифікує ділянки, де рельєфні зміщення заповнені водою, та дозволяє підвищити точність оцінки небезпечних зон деформацій поверхні (ландшафтів) в районі розташування житлових, промислових, рекреаційних об'єктів, важливих об'єктів критичної інфраструктури.

Ключові слова: дистанційне зондування, SAR, деформація рельєфу, природні та антропогенні зміни, моніторинг, охорона навколишнього середовища.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.102-114>

Вступ

Супутникові платформи Sentinel-1 з радіолокатором із синтезованою апертурою (РСА) з просторовою роздільною здатністю 10–20 метрів залежно від режиму, з комбінованим часом перебування на орбіті близько шести діб і повною незалежністю від сонячного світла та хмарності, є привабливим джерелом даних спостереження Землі для вирішення завдань виявлення змін рельєфу. З огляду на це, вони мають явну перевагу над оптичними методами виявлення природних і антропогенних змін у гіпсометричній структурі рельєфу. Google Earth Engine (GEE) містить дані Sentinel-1 у подвійній поляризації у своєму великому та актуальному архіві:

- вертикальна передача та вертикальний прийом (VV)
- горизонтальне передавання та горизонтальне приймання (HH)
- вертикальна передача і горизонтальний прийом (VV + VH)
- горизонтальна передача і вертикальний прийом (HH + HV) [1].

GEE надає не лише доступ до даних у режимі, близькому до реального часу, але й дуже потужний інтерфейс прикладного програмування (API) для обробки та візуалізації даних [2]. Наразі API GEE написаний мовою JavaScript для безпосередньої взаємодії з редактором вебкоду GEE та мовою Python для аналізу даних поза межами вебсередища GEE. Оскільки з технічних причин до архіву не включено складні комплекси з єдиним пошуком (Single Look Complex – SLC), широко використовувані інтерферометричні методи когерентності недоступні.

У своїй оригінальній публікації, що присвячена аналізу поляриметричних даних РСА [3], автори представили процедуру виявлення змін для даних РСА з множинними оглядами, включаючи тестові статистики рівності поляриметричних коваріаційних матриць, які, за припущенням, підпорядковуються складному розподілу Вішарта. Ця процедура здатна визначити, піксель за пікселем, зміни, які відбулися на будь-якому заданому рівні значущості на двох зображеннях радіолокаційної зйомки (ПЛ). Альтернативні підходи до поляриметричного виявлення змін SAR також були опубліковані в [4]. У роботі [5] описано переваги алгоритму виявлення змін на основі Вішарта, з акцентом на подвійну поляризацію, для довгих часових рядів зображень РС в архіві GEE з використанням GEE Python API. Цей алгоритм був неодноразово протестований в даній роботі в області інтересів, а саме при вивченні гірничодобувних форм рельєфу (Солотвино, Україна) [6–9].

Також було розроблено алгоритм на основі машинного навчання, збудованого в GEE за допомогою Random Forest (RF).

Тематика досліджень Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору охоплює всебічний аналіз змін компонентів навколишнього середовища. Одними з ключових напрямків досліджень є використання геоінформаційних технологій (ГІС) та технологій дистанційного зондування Землі, екологічні дослідження техногенно порушених територій [11–14, 22–26].

Методика дослідження

1. Виявлення змін у двочасових серіях зображень. Розглянемо один із способів виявлення змін у РЛ, який представлений на сайті GEE. У ньому ми досліджуємо можливість автоматичного виявлення змін рельєфу за допомогою супутників Sentinel-1.

Територією наших досліджень є природно-техногенні зони, що охоплюють агломерацію селища Солотвино та поля затоплених соляних шахт з активним розвитком карстових форм та ділянками, в яких спостерігаються вертикальні зсуви рельєфу. Для фільтрації колекції знімків ми використали супутник Sentinel-1, що складається зі знімків, отриманих у червні та серпні 2021 року. Оскільки нас цікавить виявлення гіпсометричних змін рельєфу, то для супутникових знімків [10] з активним сенсором у цьому випадку важливо, щоб кути нахилу супутника над горизонтом були однаковими на обох знімках. Також необхідно вказати висхідну (ASC) або низхідну (DESC) орбіту та номер орбіти.

Для нашого дослідження ми використовували ASC та відносний номер орбіти 131. Для досліджуваної території було отримано сім знімків (Табл. 1).

Таблиця 1. Вихідні дані для бітемпорального аналізу

Дата зйомки	Орбіта	Поляризація
07.09.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
07.15.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
07.21.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
07.27.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
08.02.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
08.08.2021	Низхідна орбіта, 131	VV
08.14.2021	Низхідна орбіта, 131	VV

Для обчислення середнього значення та дисперсії зображення можна скористатися стандартними методами, вбудованими в GEE, які дозволяють будувати графіки та діаграми. У випадку роботи з базою даних GEE поза редактором коду є можливість будувати графіки мовою Python за допомогою numpy та matplotlib.

Розподіл визначається за формулою (1):

$$p_{\gamma;\alpha;\beta}(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, \text{mean}(x) = \alpha\beta, \text{var}(x) = \alpha\beta^2, \quad (1)$$

де α – кількість зображень,

$\beta = \mu/\alpha$,

μ – розрахункове середнє значення, яке обчислюється за методом Reducer mean [14].

У нашому випадку параметр $\mu = 7$. Ми можемо перевірити це, наклавши розподіл на гістограму і поділивши гістограму на 1000, що являється коефіцієнтом масштабування. Виходить приблизний збіг в межах допустимого

значення різниці між двома параметрами – 0,3125. Також для оцінки оптимальності заданого нами АОІ доцільно провести порівняльний аналіз між двома знімками в стеку, який показує невеликі зміни, а різниця в часовому інтервалі дорівнює 6 дням (рис. 1). Для знімку була проведена класифікація методом найближчого сусіда. Але навіть за ці шість днів відбулися інформативні для нас зміни рельєфу. На знімку видно яскраві пікселі, які зумовлені гізометричними змінами рельєфу. Цікавою для нас є ділянка в центрі поселення, де відбуваються вертикальні зрушення рельєфу. Вона є найяскравішою на знімку. Решта найяскравіших пікселів можуть бути зумовлені особливістю вивчення таких ділянок за допомогою радіолокаційних даних, а саме кількістю та щільністю біомаси, змінами сільськогосподарських полів, деформаційним впливом, рухом техніки тощо [15–17].

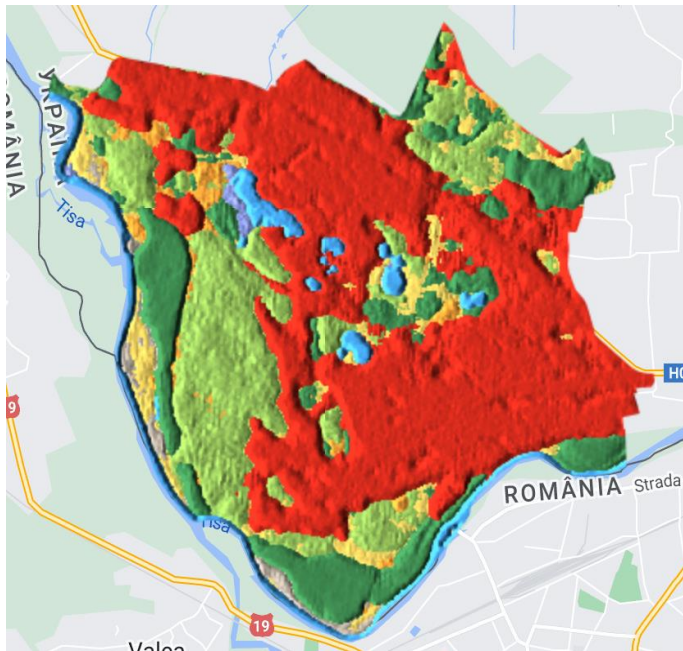


Рис. 1. Класифіковане зображення території дослідження

Ця карта показує нам зміни гіпсометрії рельєфу, але не всі зміни тут є статистично значущими, для більш детального та коректного аналізу ми можемо використати відсотковий розподіл, тобто врахувати статистично значущі зміни в пікселях. Для цього нам потрібно знати, чи є відхилення від заданого значення в кожному пікселі [18–19]. Для цього можна припустити, що значуще відхилення значення пікселя має бути більшим за 0.005.

$$Map = img1 \times 0 \text{ where } q_1 \text{ lt } 0.0005, q_1 = \frac{img1}{img2}, q_2 = \frac{img2}{img1}, \quad (2)$$

де $img1$ – перше зображення з колекції,

$img2$ – друге зображення з колекції,

Map – отримана карта.

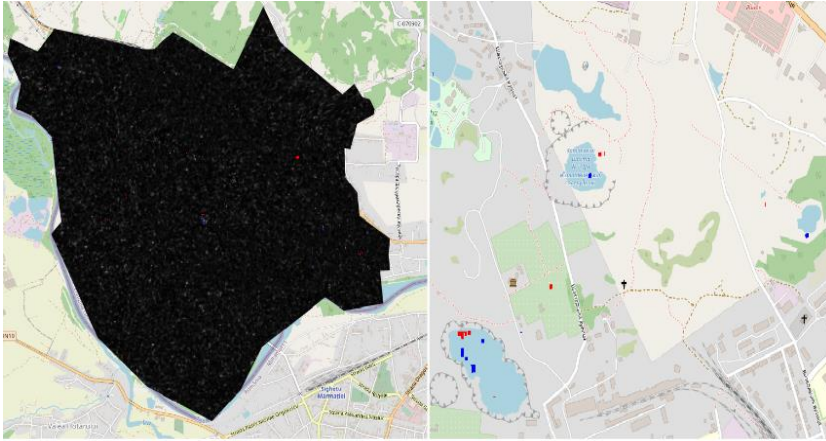


Рис. 2. Значні зміни на двох зображеннях (ліворуч). Значні зміни території дослідження (праворуч)

На отриманій карті чітко видно ділянки, де відбулися вертикальні зміни рельєфу (рис. 2). При цьому більш значні зміни з'явилися вздовж дороги в населеному пункті, ці зміни знаходяться в житловій зоні вздовж траси. У зв'язку з цим можна припустити, що там знесли якусь споруду чи дерево, або це спричинено автомобільним рухом. Що стосується нашої АОІ, то кілька пікселів у межах колишніх шахт, де відбуваються вертикальні переміщення, демонструють значні зміни. Може здатися, що пікселі лежать не в тому місці, де відбуваються зміни, але це нормально і пов'язано з просторовою роздільною здатністю супутникового знімка, а також спотворення може бути спричинене системою координат.

2. Виявлення змін у різночасових серіях зображень. Після виявлення бітемпоральних змін для Sentinel-1 доцільно також провести дослідження різночасових змін. Для цього ми обрали дещо інші дані. Для нашого регіону інтересу існувало 2 орбіти, які повністю його покривали – орбіта з номером 7 та орбіта з номером 80.

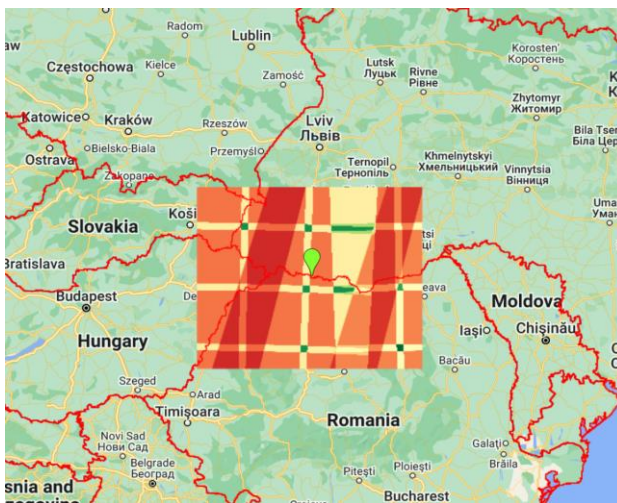


Рис. 3. Перекриття орбіт над зоною дослідження

Друга орбіта була обрана тому, що вона краще відповідала нашим вимогам, вона завжди повністю покривала АОІ. У таблиці 2 наведено 23 отриманих зображення, які ми взяли з колекції GEE.

Таблиця 2. Вихідні дані для різночасового аналізу

Дата зйомки	Орбіта	Поляризація
01.04.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
07.04.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
13.04.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
19.04.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
25.04.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
01.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
07.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
13.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
19.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
25.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
31.05.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
06.06.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
12.06.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
18.06.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
24.06.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
30.06.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
06.07.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
12.07.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
18.07.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
24.07.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
30.07.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
05.08.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH
17.08.2021	Висхідна орбіта,80	VV,VH

З останніх трьох зображень для візуального представлення даних створено RGB-комполит (рис. 4). Для цього, як показав аналіз, достатньо використовувати дані, які представлені в децибелах. На зображенні добре виділяються структури: антропогенні споруди – це найсвітліші пікселі, водне дзеркало – найтемніші пікселі.

Для подальшого дослідження території було використано всю отриману колекцію з 23 знімків. Як зазначено у роботі [20], бітемпоральний аналіз є менш статистично незалежним, тобто ймовірність не отримати хибнопозитивний результат є менш значущою, на відміну від мультитемпорального аналізу. Розв'язуючи вираз (3) для нашої кількості зображень, отримуємо досить велике значення – 19,8 відсотка.

$$a_T = 1 - (1 - \alpha)^{k-1} \quad (3)$$

де α дорівнює 0,01,
 k – кількість зображень.

Для подальшого аналізу було використано теорему Вілкіса (4), згідно з якою має існувати наближений розподіл з $k - 1$.

$$-2 \log Q_k = [k \log k + \sum_i \log s_i - k \log \sum_i s_i](-2m), \quad (4)$$

де k – кількість зображень,
 $m - 5$.

Також з наведених знімків ми можемо встановити, де вже відбуваються вертикальні зсуви та локальні ділянки водонаповнення. У зв'язку з цим нами було виділено цю ділянку, щоб зменшити нашу АОІ та, відповідно, розрахунки займали менше часу.

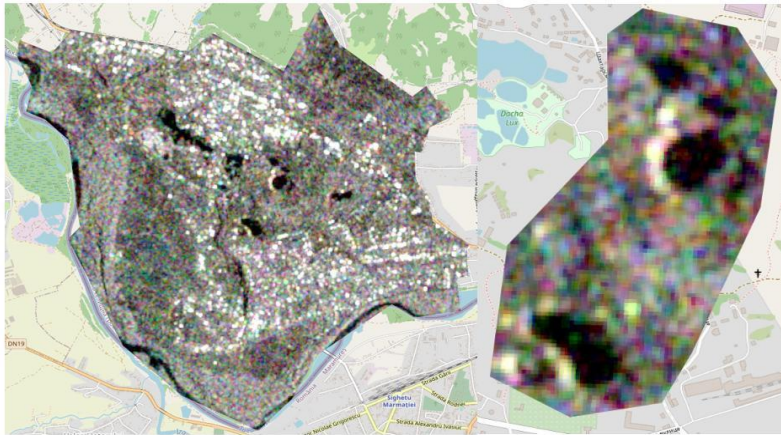


Рис. 4. RGB-композит трьох останніх знімків у зоні спостереження (ліворуч). RGB-композит трьох останніх знімків в АОІ для області, де були виявлені зміни (праворуч)

Далі було виконано порівняння пікселів в нашій колекції з розподілом χ^2 -квадрат (рис. 4). Відповідно було вибрано всю отриману колекцію зображень та виконано розрахунки за формулою 1, в даному випадку кількість зображень становить 23.

Результати дослідження

Тепер побудуємо картографічну модель, яка більш точно покаже різночасові дані про нашу зону цікавості. Для цього нами використано всю серію знімків з квітня по серпень 2021 року. На карті червоним кольором позначені ділянки, де за півроку відбулися зміни гіпсометрії поверхні. Автоматично ми визначили, де саме відбуваються ці зміни, та продемонстрували їхню просторову протяжність за допомогою карти (рис. 5). Червоні пікселі, які зустрічаються на воді, визначимо як ті, що мають значну різницю між електромагнітними та відбивними властивостями [21].

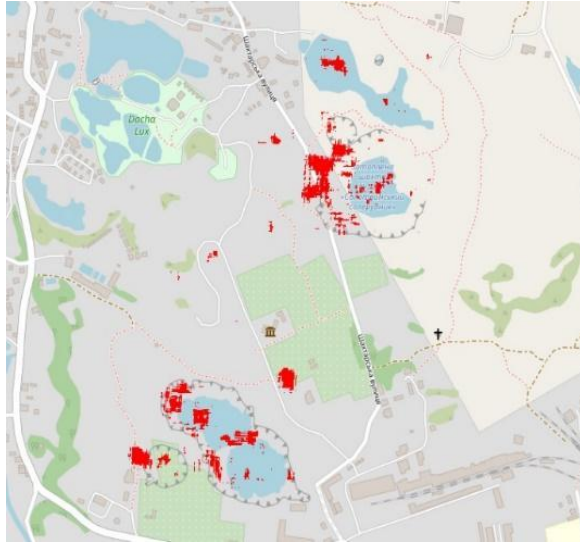


Рис. 5. Зміни поверхні на основі різночасових даних

Було побудовано карту, що відображає зміни рельєфу у часі, а саме наскільки рано (ліворуч) і наскільки сильно (праворуч) відбулися зміни (рис. 6). Чорним кольором відображено території, де відсутні зміни, перехід від темних пікселів до світлих характеризує зміну значень у сторону збільшення. Це означає, що інтенсивності відбиття VV та VH спричинені переважно змінами рельєфу. Базовою картою було обрано Open Street Map (OSM), на якій позначені існуючі карстові воронки, а саме в них відбувається більшість змін гіпсометричної структури рельєфу. Без надійної перевірки на місцевості не можна стверджувати, що побудовані нами карти змін можуть бути корисними для оцінки збитків, але їх потенційна корисність цілком очевидна.

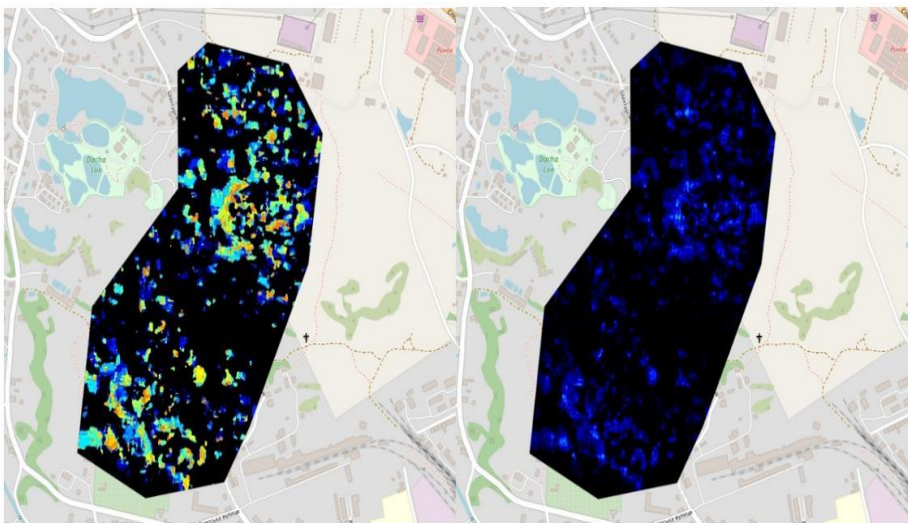


Рис. 6. Інтенсивність змін рельєфу з плином часу

Аналізуючи представлені картографічні моделі, можна припустити, що тотальні зміни рельєфу здебільшого заповнюються водою та площа водної поверхні збільшується.

Дослідити це явище можна за допомогою GEE наступним чином. Для цього необхідно вирішити задачу бінарної класифікації поверхні: водна поверхня та все інше (грунт, споруди, рослинність). У нашому ШНМ для машинного навчання було створено два вищезгадані класи, кількість дерев 30. Для визначення водної поверхні було створено 16 класів і 3 великі класи, які покривали поверхню, цей метод виявився найкращим. Було використано всю колекцію, доступну на даний момент, від першого знімка з грудня 2014 року по серпень 2021 року. За допомогою GEE було отримано 27 знімків. Зображення розташовані в хронологічному порядку, зліва направо, зверху вниз. Перший знімок, як і всі наступні, є медіанним зображенням за три місяці. Отже, картографічні моделі демонструють динаміку затоплення порушених ділянок рельєфу.

Для отримання такого часового ряду було використано всі знімки з колекції та застосовано до них функцію медіанного значення за кожні три місяці, щоб зменшити кількість запитів до бази даних GEE, оскільки вона має ліміт на один запит і не дозволяє робити більше 5000 запитів за один раз. Через відсутність у базі даних GEE даних SLC, які дозволяють проводити інтерферометрію, цей метод, за певних умов, може підказати, де і наскільки, як часто відбуваються вертикальні зсуви рельєфу. Згідно з дослідженням, на цій території є зсуви, шахти яких розташовані в тих місцях, де підвищується рівень водної поверхні.

Висновки

Використовуючи описані методи та алгоритми, ми можемо порівнювати карти, створені на основі початкової та кінцевої колекції знімків, що відобразатимуть серйозні зміни. Згідно з попередніми дослідженнями, в нашій зоні інтересу знаходяться три шахти, які спричиняють вертикальні зсуви рельєфу. За допомогою порівняння останніх доступних знімків у серпні 2021 року було виявлено, що зміни в каналі VV збігаються з розташуванням цих трьох шахт. Потім було використано різночасовий аналіз шестимісячних знімків для виявлення та картографування змін, які показують, як вони відбуваються кількісно та в часі. Заключним етапом дослідження стала розробка алгоритму, який використовує всю наявну колекцію зображень, а карти були створені за допомогою візуалізації супутникових радіолокаційних знімків. Також на основі GEE JavaScript API було створено вебдодаток, за допомогою якого можна проводити моніторинг змін рельєфу на досліджуваній території. Якщо порівняти першу та останню карти (рис. 7), то добре видно, як змінився рельєф під впливом антропогенного фактору.

Місця прискореного осідання земної поверхні та площі затоплення добре ідентифікуються на супутникових знімках та дають змогу відслідковувати їх динаміку з моменту появи. Зліва перший знімок – зимовий і, можливо, не вся водна поверхня річки, яка протікає вздовж південно-західного кордону селища, потрапила в аналіз, що можна пояснити ускладненим розпізнаванням мерзлої води. На лівому знімку також є невеликі плями, які також пов'язані з наявністю снігу, такі плями можна побачити на всіх зимових знімках. На

правому знімку чітко видно ділянки, де розвивається зсув земної поверхні під впливом антропогенного фактору. Вся серія знімків може бути використана для оцінки швидкості цього руху.

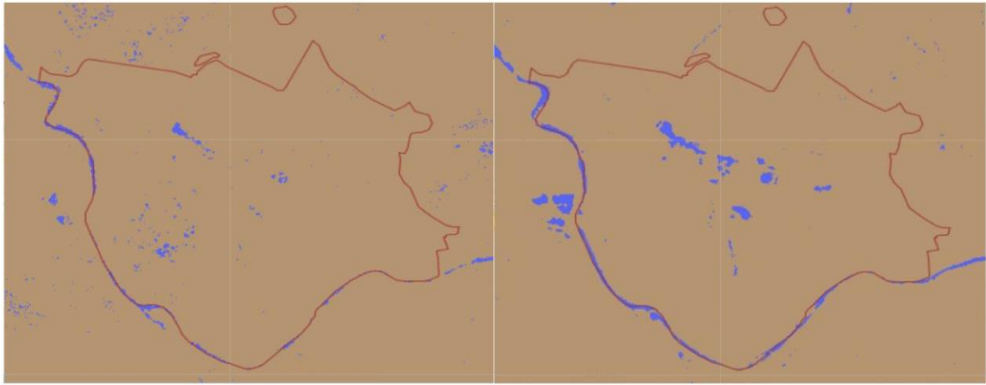


Рис. 7. Порівняння першого (ліворуч) та останнього (праворуч) супутникових знімків

Таким чином, вищезазначені методи дозволять:

- підвищити точність оцінки небезпечних зон деформацій поверхні (ландшафтів) в районі розташування житлових, промислових, рекреаційних об'єктів, важливих об'єктів критичної інфраструктури;
- виявити на ранній стадії загрозу розвитку та активізації гірничо-технологічних деформацій рельєфу;
- виявити антропогенно порушені території, які потенційно піддаються підтопленню;
- кількісно ідентифікувати зміни гіпсометричних форм рельєфу, які заповнюються водою та формують ділянки інженерно-геологічної небезпеки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
2. Mutanga, O.; Kumar, L. Google Earth Engine Applications. (2019). *Remote Sens.* 11, 591. <https://doi.org/10.3390/rs11050591>.
3. Conradsen, K., Nielsen, A., Schou, J., Skriver, H. (2003). A test statistic in the complex Wishart distribution and its application to change detection in polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 4-19. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808066>
4. Akbari, V., Anfinsen, S. N., Doulgeris, A. P., Eltoft, T., Moser G., Serpico S. B. (2016). Polarimetric SAR Change Detection with the Complex Hotelling–Lawley Trace Statistic, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54 (7), 3953-3966. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2532320>
5. Canty, M.J., Nielsen, A.A., Conradsen, K., & Skriver, H. (2019). Statistical Analysis of Changes in Sentinel-1 Time Series on the Google Earth Engine. *Remote. Sens.*, 12, 46. <https://doi.org/10.3390/rs12010046>

6. Trofymchuk, O., Kolodyazhnyy, O., Yakovlev, E. (2014). Hazardous activation of Landslides Within Western Carpathian Region (Ukraine). In: Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y. (eds) *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05050-8_82/
7. Risk Assessment Report of Advisory Mission to Ukraine. (2016). Solotvyno salt mine area. Union Civil Protection Mechanism of EU.
8. Anpilova, Y., Hordiienko, O., Horbulin, V., Trofymchuk, O., Yakovliev, Y. (2021). The use active sensors of remote sensing to describe structures and landscape changes in Solotvyno. In: *Conference Proceedings, Geoinformatics, May 2021, Volume 2021, 1-7*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521018>
9. Anpilova, Y., Yakovliev, Y., Trofymchuk, O., Myrontsov, M., Karpenko, O. (2022). Environmental hazards of the Donbas hydrosphere at the final stage of the coal mines flooding. In *Systems, Decision and Control in Energy III. Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, Cham, 305-316. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87675-3_19
10. Martin-del-Campo-Becerra, G.D., Reigber, A., Nannini, M., Hensley, S. (2020). Single-Look SAR Tomography of Urban Areas, *Remote Sensing*, doi: <https://doi.org/10.3390/rs12162555>
11. Trofymchuk, O., Anpilova, Y., Hordiienko, O., Myrontsov, M., Karpenko, O. (2023). Method for Detecting Natural and Anthropogenic Changes That Filled with Water in Landscapes Using Radar Satellite Imagery. In: Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*, 481. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_46
12. Trofymchuk, O., Anpilova, Ye., Yakovlev, Ye., Kreta, D., Shekhunova, S. (2020). Assessment of Solotvyno agglomeration mines flooding impact on water resources with GIS. In *Monografie - Politechnika Lubelska. Water Supply and Wastewater Disposal: Designing, Construction, Operation and Monitoring*, 315-327.
13. O. Trofymchuk, Y. Yakovliev, Y. Anpilova, M. Myrontsov, V. Okhariev, (2021). Ecological Situation of Post-mining Regions in Ukraine. *Decision and Control in Energy II*, 293-306, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_17
14. Trofymchuk, O., Anpilova, Y., Yakovliev, Y., Zinkiv, I. (2020). Ground Deformation Mapping of Solotvyno Mine Area Using Radar Data and GIS. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo138>
15. Bovenga, F. (2020). Special Issue "Synthetic Aperture Radar (SAR) Techniques and Applications", doi: <https://doi.org/10.3390/s20071851>
16. Canisius, F., Brisco, B., Murnaghan, K., Kooij, M., Keizer, E. (2019). SAR Backscatter and InSAR Coherence for Monitoring Wetland Extent, Flood Pulse and Vegetation: A Study of the Amazon Lowland, doi: <https://doi.org/10.3390/rs11060720>
17. Monti-Guarnieri, A., Manzoni, M., Giudici, D., Recchia, A., Tebaldini, S. (2020). Vegetated Target Decorrelation in SAR and Interferometry: Models, Simulation, and Performance Evaluation. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12162545>
18. Zhao, J., Yu, A., Zhang, Y., Zhu, X., Dong, Z. (2019). Spatial Baseline Optimization for Spaceborne Multistatic SAR Tomography Systems. doi: <https://doi.org/10.3390/s19092106>.
19. Morton, C. (2019). *Image Analysis, Classification, and Change Detection in Remote Sensing*, 4th ed., Boca Raton, BR.
20. Conradsen, K., Nielsen, A., Skriver, H. (2016). Determining the Points of Change in Time Series of Polarimetric SAR Data. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/7398022>
21. Liang, S., Wang, J. (2019). *Advanced Remote Sensing 2nd ed.*, Beijing, BJ.
22. Trofimchuk, A., Vasyanin, V. (2015). Simulation of Packing, Distribution and Routing of Small-Size Discrete Flows in a Multicommodity Network. *Journal of Automation and Information Sciences*, 47, 15-30. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v47.i7.30>
23. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., Klymenkov, O. (2018). TXT-tool 2.380-1.1: Monitoring and Early Warning System of the Building Constructions of the Livadia Palace, Ukraine. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57774-6_37

24. Anpilova, Y., Dovgyi, S., Yakovliev, Y., Hordiienko, O., Myrontsov, M., Karpenko, O. (2023). Impact of Modern Anthropogenic Factors on the Hydrological System of the Donbas. In: Zaporozhets, A., Popov, O. (eds) Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control, vol 456. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0_16
25. Kaliukh, I., Trofymchuk, O., Farenjuk, G., Ivanik, O., Shekhunova, S. (2019). Practical measures for landslide risk mitigation in the Ukrainian Carpathians. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902165>
26. Kaliukh, I., Trofymchuk, O., Lebid, O. (2019). Numerical Solution of Two-Point Static Problems for Distributed Extended Systems by Means of the Nelder–Mead Method. *Cybern Syst Anal*, 55, 616–624. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00170-3>

Стаття надійшла до редакції 13.12.2023 і прийнята до друку після рецензування 08.04.2024

The article was received 13.12.2023 and was accepted after revision 08.04.2024

Трофимчук Олександр Миколайович

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

Гордієнко Олександр Вікторович

молодший науковий співробітник Відділу природних ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ
Адреса робоча: Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна, 03186
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4891-3410> **e-mail:** gordiienko.ov@gmail.com

Анпілова Євгенія Сергіївна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Відділу природних ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, старший науковий співробітник Відділу обчислювальних гідросистем (CHS), Центр екологічних досліджень ім. Гельмгольца
Адреса робоча: Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна, 03186
Пермозерштрассе, 15, Лейпциг, Німеччина, 04318
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4107-0617> **e-mail:** yevheniia.anpilova@ufz.de

Яковлев Євгеній Олександрович

доктор технічних наук, головний науковий співробітник Відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ
Адреса робоча: Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна, 03186
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6562-4015> **e-mail:** yakovlevhydro@gmail.com

УДК 504.054:528.8+519.23

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

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

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

INFORMATION SUPPORT OF DECISION MAKING FOR TECHNOGENIC AND ENVIRONMENTAL SAFETY USING GEOSPATIAL DATA ANALYSIS

Abstract. *The article researches the problems of development of the environmental decision support systems, which arise due to the natural complexity of natural systems and the multidisciplinary nature of environmental safety problems. Non-linear interactions of natural processes, spatial and temporal variability of environmental phenomena, as well as issues of data quality and availability stand out among the key problems. Technological and methodological challenges are considered, such as development and validation of models, ensuring user-friendliness of the interface, integration with existing systems, and the problem of scalability and performance of the DSS. Special attention is paid to the role of geospatial data and geographic information systems (GIS) in tasks of information support for decision-making. GIS is the core of modern GIS, providing management, analysis and visualization of geospatial data, which significantly increases the capabilities of these systems. The advantages of GIS in the context of managing large volumes of geospatial data, their integration with other data sets, spatial analysis and modeling, as well as visualization and communication of results are defined. The article proposes a conceptual model that describes the infrastructure of information support for decision-making in the field of man-made and environmental safety, the central element of which is GIS. The authors propose the differentiation of geospatial data analysis tasks into two modules, one of which specializes in the analysis of regional environmental monitoring data for the ecological assessment of the territory's condition, the formation of medium- and long-term forecasts. The second module specializes in the assessment of risks from emergency situations, primarily related to military operations. The key goal is to assess the potential environmental consequences of catastrophic events at critical infrastructure facilities. The architecture includes sets of data sources such as remote sensing data and environmental statistics, blocks of statistical analysis and mathematical modeling, a block of data integration based on GIS, blocks of environmental assessment and scenario modeling. Each of these components performs critically important functions to ensure effective decision-making in the field of environmental technogenic and ecological safety and management of natural resources.*

Keywords: *environmental decision support systems, geographic information technology, remote sensing, geospatial data analysis, environmental assessment, scenario modeling.*

В.О. Охарєв, С.Г. Підсадній

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

ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА РІШЕНЬ В СФЕРІ ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТЕРИТОРІЙ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ

***Анотація.** У статті досліджуються проблеми інформаційної підтримки прийняття рішень в сфері техногенно-екологічної безпеки, які виникають через природну складність антропоєкосистем та мультидисциплінарний характер проблем екологічної безпеки. Серед ключових проблем виділяються нелінійні взаємодії природних процесів, просторова і часова мінливість екологічних явищ, а також питання якості і доступності даних. Розглядаються технологічні та методологічні виклики, такі як розробка і валідація моделей, забезпечення зручності інтерфейсу для користувачів, інтеграція з існуючими системами та проблема масштабованості і продуктивності систем підтримки прийняття рішень. Особливу увагу приділено ролі геопросторових даних і геоінформаційних систем (ГІС) у завданнях інформаційної підтримки прийняття рішень. ГІС є ядром сучасних СППР, забезпечуючи управління, аналіз і візуалізацію геопросторових даних, що значно підвищує можливості цих систем. Визначено переваги ГІС у контексті управління великими обсягами геопросторових даних, їх інтеграції з іншими наборами даних, просторового аналізу та моделювання, а також візуалізації та комунікації результатів. В статті пропонується концептуальна модель, яка описує інфраструктуру інформаційної підтримки прийняття рішень в сфері техногенно-екологічної безпеки, центральним елементом якої є ГІС. Автори пропонують диференціацію задач з аналізу геопросторових даних на два модулі, один з яких спеціалізується на аналізі регіональних даних екологічного моніторингу для екологічної оцінки стану територій, формування середньо- та довгострокових прогнозів. Другий модуль спеціалізується на оцінці ризиків від виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних в першу чергу з військовими діями. Ключовою метою є оцінка потенційних екологічних наслідків катастрофічних подій на об'єктах критичної інфраструктури. Архітектура включає набори джерел даних (дистанційне зондування, екологічна статистика), блоки статистичного аналізу та математичного моделювання, блок інтеграції даних на базі ГІС, блоки екологічної оцінки та сценарного моделювання. Кожен з цих компонентів виконує критично важливі функції для забезпечення ефективного прийняття рішень у сфері екологічної техногенно-екологічної безпеки та управління природокористуванням.*

***Ключові слова:** екологічні системи підтримки прийняття рішень, геоінформаційні технології, дистанційне зондування Землі, геопросторовий аналіз, екологічна оцінка, сценарне моделювання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.115-129>

Вступ

Виклики, що сьогодні постали перед системою управління екологічною безпекою в Україні, фактично, є безпрецедентними. Бойові дії такої інтенсивності не велися в Європі з 1945 року, а в країнах із сучасною складною економікою та структурою природокористування не велися ніколи.

Комплексний погляд на проблему дає підстави вважати військову агресію Російської Федерації проти України причиною найбільшої екологічної катастрофи в історії людства в масштабах окремої країни. Наприклад, більше 20% земель сільськогосподарського призначення на сьогодні є непридатними для використання через замінування, поточні бойові дії та окупацію, що на порядок перевищує аналогічний показник після аварії на Чорнобильській атомній електростанції, яка до цього вважалась наймасштабнішою техногенною катастрофою в історії України. Шкода від потенційної аварії на тимчасово окупованій Запорізькій АЕС також може перевищити наслідки Чорнобильської катастрофи. Руйнування дамби Каховської гідроелектростанції також є безпрецедентним в історії за масштабом техногенного об'єкта та наслідками для екосистеми регіону. Наведені ці та інші приклади дають підстави зробити висновки про те, що проблема оцінки та прогнозування екологічного стану постраждалих територій України в силу свого масштабу та комплексності є новою для світової науки. Складність проблеми посилюється через фактичну неможливість коректного прогнозування екологічного стану для тих територій, де інтенсивні військові дії все ще тривають або мають відбутися у майбутньому.

Процес управління техногенно-екологічною безпекою територій в таких умовах містить проблему прийняття оптимальних управлінських рішень в умовах невизначеності. Це, в свою чергу, посилює значення оперативного та максимально комплексного інформаційного забезпечення процесу управління [1, 2]. Актуальні досягнення науки про дані дозволяють проводити комплексний аналіз великих масивів інформації, виокремлення ключових тенденцій, побудову прогнозів та сценарне моделювання [3]. При цьому, в умовах проблеми, що розглядається, критично важливим аспектом є забезпечення отримання таких даних, його оперативність, неперервність та комплексність.

Враховуючи вищеописану актуальність задачі та перераховані фактори, що ускладнюють її вирішення, **метою** авторів є створення концептуальної моделі інформаційної підтримки прийняття рішень в сфері техногенно-екологічної безпеки, що заснована на широкому використанні інструментів аналізу масивів геопросторових даних в умовах їх неповноті. Роль геоінформаційної складової розкрита авторами нижче у теоретико-методичній частині статті.

Виклад основного матеріалу дослідження

Інформаційна підтримка прийняття рішень в сфері екологічної безпеки та природокористування представляє собою перспективний напрям для підвищення ефективності та точності екологічного управління та підвищення оперативності прийняття рішень. Однак ця інтеграція пов'язана з проблемами, які впливають із внутрішньої складності екологічних систем, міждисциплінарного характеру екологічної науки та різноманітних інтересів зацікавлених сторін. Дана стаття досліджує ці виклики, пропонуючи комплексний аналіз факторів, які ускладнюють розробку та впровадження СППР у цій критично важливій сфері.

Серед ключових з таких факторів слід виділити складність екосистем. Екосистеми характеризуються своєю динамічністю та взаємопов'язаністю. Природні екосистеми містять численні взаємодіючі компоненти, включаючи

біологічні, хімічні та фізичні елементи. На ці системи впливають не лише природні процеси, але також антропогенні чинники, такі як урбанізація, індустріалізація та сільське господарство. Складність цих взаємодій робить фактично неможливим імітаційне моделювання функціонування екосистем в цілому.

Також слід відзначити динамічність та нелінійність взаємодії в екосистемах. Процеси в навколишньому середовищі часто демонструють нелінійну поведінку та цикли зворотного зв'язку, які можуть призвести до неочікуваних результатів. Наприклад, зв'язок між забруднювачами та станом екосистеми не є лінійним; невелике збільшення певних забруднюючих речовин може призвести до непропорційно великого впливу на стан навколишнього середовища. Цю нелінійність потрібно точно врахувати в моделях систем підтримки прийняття рішень, щоб ефективно передбачати результати [4].

Іншими важливими чинниками, що ускладнюють проблему, є:

- часова та просторова мінливість. Екологічні явища змінюються в різних просторових масштабах і з часом. Наприклад, вплив зміни клімату може мати глобальний масштаб, але може проявлятися дуже по-різному на регіональному чи місцевому рівнях. СППР має бути в змозі врахувати ці варіації, щоб надати відповідні та точні вказівки.

- доступність і якість даних [5]. Надійні дані є ключовою вимогою будь-якої СППР. Проте масиви екологічних даних часто є неповними або невизначеними. Різниця в якості та доступності даних може значно перешкодити розробці надійних СППР. Технології дистанційного зондування Землі покращили можливості збору даних, але проблеми ефективної інтеграції цих джерел даних залишаються.

- мультидисциплінарність та інтеграція міждисциплінарних знань. Екологічна безпека та природокористування за своєю суттю є багатодисциплінарними галузями, що включають екологію, хімію, географію, соціологію, економіку тощо. Ця різноманітність створює кілька проблем для розробки СППР. Розробка СППР вимагає інтеграції знань з різних дисциплін для створення комплексної моделі. Ця інтеграція є складною через відмінності в термінології, методології та епістемології в різних дисциплінах. Ефективне спілкування та співпраця між експертами з різних галузей є важливими, але часто важко досягнутими.

- проблема залучення зацікавлених сторін (стейкхолдерів). Екологічні рішення впливають на широке коло зацікавлених сторін, включаючи державні установи, неурядові організації, підприємства та широку громадськість. Кожна група має свої пріоритети, цінності та інтереси. Залучення цих зацікавлених сторін до процесу розробки СППР має вирішальне значення для того, щоб система відповідала певним проблемам і була прийнята її користувачами. Однак узгодження суперечливих інтересів і досягнення консенсусу може бути серйозною проблемою.

- особливості регуляторної політики. Екологічна СППР повинна діяти в рамках існуючої політики та правил. Ці політики можуть значно відрізнитися в різних регіонах і можуть змінюватися з часом. Розробники та користувачі СППР повинні переконатися, що їхні системи є гнучкими та адаптованими до цих варіацій та оновлень. Це вимагає постійного моніторингу регуляторної політики та регулярних оновлень системи [6].

Розробка СППР для екологічної безпеки та природокористування включає кілька технологічних і методологічних перешкод:

- розробка та перевірка моделі. Створення точних моделей екологічних систем потребує складних математичних та обчислювальних методів. Ці моделі потрібно перевірити за допомогою історичних даних, що може бути складним завданням через вищезазначені проблеми з якістю та доступністю даних. Забезпечення точності та надійності моделей є критичним, але складним аспектом розробки СППР.

- інтерфейс користувача та досвід. Ефективність інформаційної підтримки рішень залежить не лише від точності її моделей, але й від зручності її використання. Система повинна представляти складні дані та результати аналізу в зрозумілій та доступній формі. Розробка зручних інтерфейсів, які можуть використовуватися неспеціалістами, є серйозною проблемою. Система повинна надавати корисну інформацію, не перевантажуючи користувачів технічними деталями.

- інтеграція з існуючими системами та реєстрами. Багато організацій уже використовують різні інформаційні системи для управління навколишнім середовищем. Інтеграція нової СППР із цими існуючими системами може бути технічно складною. Проблеми сумісності, протоколи передачі даних і забезпечення безперебійної роботи є критично важливими аспектами.

- масштабованість і продуктивність. Екологічні СППР часто потребують обробки великих обсягів даних і виконання складних обчислень. Необхідно забезпечити можливість масштабування системи для обробки зростаючих навантажень даних і надання своєчасних відповідей, що вимагає ретельного розгляду архітектури системи та оптимізації продуктивності.

- прозорість і підзвітність: СППР має бути прозорою в аспекті джерел походження даних, що означає чітке документування моделей, джерел даних і припущень, які використовуються в системі. Забезпечення підзвітності за рішення, прийняті на основі рекомендацій системи, також має вирішальне значення, особливо у випадках, коли ці рішення мають значний соціальний або екологічний вплив.

- конфіденційність і безпека: використання екологічних даних, зокрема даних, зібраних від приватних комерційних підприємств, створює виклики щодо конфіденційності та безпеки даних. СППР має включати надійні заходи для захисту конфіденційної інформації та відповідати відповідним нормам захисту даних.

Щоб проілюструвати проблеми та потенційні рішення у розробці екологічних СППР, корисно розглянути деякі тематичні приклади:

- адаптація до зміни клімату. СППР розробляється, щоб допомогти громадам адаптуватися до наслідків зміни клімату. Ці системи об'єднують кліматичні моделі, соціально-економічні дані та місцеві знання, щоб надавати рекомендації з таких питань, як боротьба з повеннями, сільське господарство та розвиток інфраструктури. Складність кліматичних моделей і потреба в локальному налаштуванні підкреслюють проблеми точності моделей і залучення зацікавлених сторін.

- збереження біорізноманіття. СППР використовуються для підтримки зусиль зі збереження біорізноманіття шляхом виявлення критичних середовищ існування, оцінки загроз і визначення пріоритетів дій щодо збереження. Ці

системи повинні інтегрувати екологічні моделі з даними про землекористування, економічні міркування та соціальні фактори. Міждисциплінарний характер збереження біорізноманіття та потреба в інтеграції даних у реальному часі є ключовими проблемами в цій програмі.

– оцінка забруднення, що включає моніторинг і прогнозування рівнів забруднюючих речовин, оцінку ризиків для здоров'я та рекомендації щодо заходів пом'якшення. Ці системи значною мірою покладаються на точні та своєчасні дані з різних джерел, включаючи датчики якості повітря та води, а також дані дистанційного моніторингу [7]. Забезпечення надійності даних і рівень ефективності інформування про ризики є серйозними перешкодами.

Геопросторові дані та геоінформаційні системи (ГІС) відіграють ключову роль у покращенні можливостей систем підтримки прийняття рішень (СППР) щодо екологічної безпеки та природокористування. Інтеграція цих технологій полегшує збір, аналіз і візуалізацію даних про навколишнє середовище з просторовою прив'язкою, забезпечуючи надійну основу для прийняття обґрунтованих рішень. У цій статті розглядається значення геопросторових даних і ГІС, досліджується їхній внесок, виклики та потенціал у сфері екологічних СППР.

Геопросторові дані стосуються інформації, яка має географічну складову, охоплюючи дані про поверхню Землі та її особливості [7, 8]. Ці дані мають вирішальне значення для управління навколишнім середовищем з кількох причин:

– просторове уявлення. Явища навколишнього середовища за своєю суттю є просторовими, змінюються в різних місцях і регіонах. Геопросторові дані надають засоби для точного представлення цих варіацій, дозволяючи краще зрозуміти просторові закономірності та зв'язки.

– контекстуальний аналіз. Враховуючи географічний контекст, геопросторові дані дозволяють більш комплексно аналізувати екологічні проблеми. Наприклад, вплив вирубки лісів можна краще зрозуміти, якщо аналізувати його в поєднанні з даними про землекористування, щільність населення та заповідні території.

– інтеграція даних: геопросторові дані служать загальною основою для інтеграції різних типів даних про навколишнє середовище. Ця інтеграція є важливою для створення цілісних моделей, які враховують численні фактори та їх взаємодію [9].

– моніторинг часової динаміки. Всі екологічні процеси є динамічними та розвиваються з часом. Геопросторові дані, зібрані за допомогою дистанційного зондування та інших технологій, можна використовувати для моніторингу змін з часом, надаючи критичне розуміння тенденцій і закономірностей.

ГІС-технології дозволяють маніпулювати, аналізувати та візуалізувати геопросторові дані, значно підвищуючи функціональність екологічних СППР. Нижче позначено ключові ролі ГІС у цьому контексті:

– керування даними та інтеграція. ГІС надає надійні інструменти для керування великими обсягами просторових даних із різних джерел. Це дозволяє інтегрувати дані із супутникових знімків, аерофотознімків, наземних датчиків та історичних записів, створюючи повний набір даних для аналізу.

– просторовий аналіз. ГІС пропонує широкий спектр можливостей просторового аналізу, включаючи аналіз накладання, буферний аналіз та просторову інтерполяцію. Ці інструменти дозволяють користувачам аналізувати просторові відносини, визначати закономірності та моделювати екологічні процеси. Наприклад, ГІС можна використовувати для оцінки придатності середовищ існування для видів, що знаходяться під загрозою зникнення, шляхом аналізу просторових даних про рослинність, клімат і діяльність людини.

– візуалізація та комунікація. Ефективна візуалізація має вирішальне значення для інтерпретації складних даних навколишнього середовища. ГІС надає розширені інструменти візуалізації, включаючи карти, 3D-моделі та інтерактивні інформаційні панелі, які допомагають донести результати до зацікавлених сторін. Візуалізація сприяє кращому розумінню та підтримує більш обґрунтоване прийняття рішень.

– моделювання сценаріїв. ГІС можна використовувати для розробки та оцінки різних сценаріїв, дозволяючи тим, хто приймає рішення, досліджувати потенційні наслідки різних дій. Наприклад, моделі на основі ГІС можуть моделювати вплив змін у землекористуванні на якість води, допомагаючи визначити найбільш стійкі стратегії розвитку.

Застосування ГІС в екологічних СППР є великими та різноманітними, що відображає різноманітний характер екологічних проблем. Деякі відомі програми включають:

– управління в надзвичайних екологічних ситуаціях: ГІС відіграє вирішальну роль у боротьбі з катастрофами, надаючи інструменти для картографування небезпек, оцінки ризиків і планування реагування на надзвичайні ситуації. Наприклад, ГІС можна використовувати для моделювання зон ризику затоплення, що дозволяє розробляти ефективні стратегії пом'якшення повеней і плани реагування на надзвичайні ситуації [10].

– адаптацію в умовах кліматичних змін: СППР на основі ГІС відіграють важливу роль у зусиллях з адаптації до зміни клімату. Ці системи об'єднують кліматичні моделі, оцінки вразливості та стратегії адаптації, щоб допомогти громадам і політикам упоратися з наслідками зміни клімату. ГІС може визначити зони, які піддаються найбільшому ризику через підвищення рівня моря, спеку та інші небезпеки, пов'язані з кліматом, інформуючи про цілеспрямовані заходи адаптації.

– раціональне природокористування. Ефективне управління природними ресурсами, такими як вода, ліси та корисні копалини, значною мірою залежить від геопросторових даних. СППР на основі ГІС підтримує стале управління ресурсами, надаючи інструменти для інвентаризації ресурсів, моніторингу та планування. Наприклад, ГІС можна використовувати для оптимізації розподілу води в річкових басейнах, забезпечуючи справедливий розподіл і стале використання [11].

– міське планування та розвиток. Урбанізація створює значні екологічні проблеми, включаючи втрату середовища проживання, забруднення та збільшення потреби в ресурсах. ГІС допомагає міським планувальникам у розробці стратегій сталого розвитку міст. Ці системи можуть аналізувати моделі землекористування, оцінювати вплив на навколишнє середовище та визначати відповідні місця для нових розробок.

Незважаючи на значні переваги використання геопросторових даних і ГІС в екологічних СППР, необхідно вирішити кілька проблем і обмежень:

- якість і точність даних. Надійність аналізу на основі ГІС залежить від якості та точності базових геопросторових даних. Неточні або застарілі дані можуть призвести до неправильних висновків і прийняття неправильних рішень. Забезпечення точності даних вимагає суворої перевірки та регулярного оновлення.

- інтеграція даних і сумісність. Інтеграція даних із різних джерел може бути складною через відмінності у форматах, масштабах і роздільній здатності. Проблеми взаємодії можуть перешкоджати бездоганній інтеграції геопросторових даних, впливаючи на загальну ефективність СППР.

- технічна складність. Розширені можливості ГІС вимагають спеціальних знань і навичок. Розробка та підтримка СППР на основі ГІС може бути технічно складною та ресурсомісткою, створюючи проблеми для організацій з обмеженим технічним досвідом або фінансовими ресурсами.

- обчислювальні потужності. СППР на основі ГІС часто потребують обробки великих наборів даних і виконання складного аналізу, що може вплинути на продуктивність системи. Забезпечення масштабованості та підтримання продуктивності в міру зростання обсягів даних є серйозною технічною проблемою.

Інтеграція геопросторових даних і ГІС у екологічну СППР є науково-прикладною задачею зі значним потенціалом для майбутніх досліджень. Наступні технологічні можливості матимуть принципове значення для сфери управління техногенно-екологічною безпекою:

- удосконалення дистанційного зондування: інновації в технологіях дистанційного зондування, таких як супутники з високою роздільною здатністю, дрони та датчики Інтернету речей, підвищують доступність і якість геопросторових даних. Ці досягнення дозволяють більш детально та своєчасно проводити моніторинг та аналіз навколишнього середовища [12, 13].

- штучний інтелект і машинне навчання: інтеграція ШІ та машинного навчання з ГІС відкриває нові можливості для екологічних СППР. Ці технології можуть покращити аналіз геопросторових даних, забезпечуючи точніші прогнози, виявлення аномалій і автоматизоване прийняття рішень.

- хмарні обчислення та великі дані: платформи хмарних обчислень і технології великих даних змінюють спосіб зберігання, обробки та аналізу геопросторових даних. Ці технології пропонують масштабовані рішення для керування великими наборами геопросторових даних і виконання комплексного аналізу, що робить СППР на основі ГІС більш доступним і потужним.

- інтеграція з іншими інструментами підтримки прийняття рішень: інтеграція СППР на основі ГІС з іншими інструментами підтримки прийняття рішень, такими як економічні моделі, оцінки соціального впливу та системи аналізу ризиків, може створити більш комплексні та надійні системи. Ця інтеграція може підтримувати більш цілісне прийняття рішень, яке враховує ширший спектр факторів і перспектив.

На основі вищеописаних теоретико-методичних особливостей функціонування СППР пропонується модель інфраструктури інформаційної підтримки рішень в сфері екологічного управління, яка буде актуальною саме

для території України, на якій в силу військових дій, що продовжуються, існує постійний високий ризик виникнення надзвичайних екологічних ситуацій. Особливістю моделі, що пропонується, є розділення процесів аналізу масивів екологічної інформації, що надходить, на два функціональних модулі. Модуль 1 спеціалізується на аналізі регіональних даних екологічного моніторингу, що мають постійно акумулюватись у відповідних базах даних відповідальних державних організацій та установ. Метою аналізу є проведення комплексної екологічної оцінки стану територій, формування середньо- та довгострокових прогнозів та видача рекомендацій, що можуть бути використані особами, що приймають рішення. Модуль 2 спеціалізується на оцінці ризиків від виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних в першу чергу з військовими діями. Ключовою метою є оцінка потенційних екологічних наслідків катастрофічних подій на об'єктах критичної інфраструктури (разових або таких, що тривають певний період часу). Концептуальна модель представлена у вигляді блок-схеми на рис. 1.

Розглянемо детальніше зміст наведеної моделі із прикладами застосування її елементів у попередніх дослідженнях. Зокрема, для аналізу даних, що відображають динаміку рівня навантаження на екосистеми територій, пропонується використовувати дані контактних вимірів фізичних, хімічних та біологічних параметрів атмосфери, ґрунтового покриву та акваторій. Приклади застосування інформаційних технологій для удосконалення даних процесів, зокрема для задач екологічної безпеки басейну р. Дністер та прилеглих природно-заповідних територій, представлені в роботах [14–17].

Вимоги до оперативності, точності та максимального покриття території екологічним моніторингом потребує комплексування контактних та дистанційних методів, зокрема доповнення наземних вимірів даними, отриманими дистанційно, а саме за допомогою технологій дистанційного зондування Землі з космосу та технологій безпілотних літальних апаратів із подальшою тематичною обробкою отриманих космічних та аерофотознімків. Для підвищення ефективності роботи системи інформаційної підтримки прийняття рішень, доцільно створити єдину базу таких зображень із доступом до постійної актуалізації за допомогою існуючої світової інфраструктури відкритих даних, наприклад, на базі проєктів COPERNICUS та NOAA. Приклади застосування актуальних технологій обробки космічних знімків для задач інформаційного забезпечення екологічного управління наведені в роботах [18, 19].

Якщо набір даних про стан довкілля є статистично коректним (дані багаторічні, отримані через рівні проміжки часу, дозволяють будувати часові ряди), доцільним є застосування при аналізі методів математичної статистики. Роботи [20, 21] присвячені застосуванню багатопараметричного кореляційного аналізу із розрахунком коефіцієнта динамічної кореляції для багаторічних даних регіонального рівня про стан навколишнього середовища. Методи математичного моделювання також активно використовуються при аналізі даних в геоінформаційному середовищі, зокрема, для задач раціонального видобутку мінеральних ресурсів. Приклади такого застосування наведені в [22, 23].

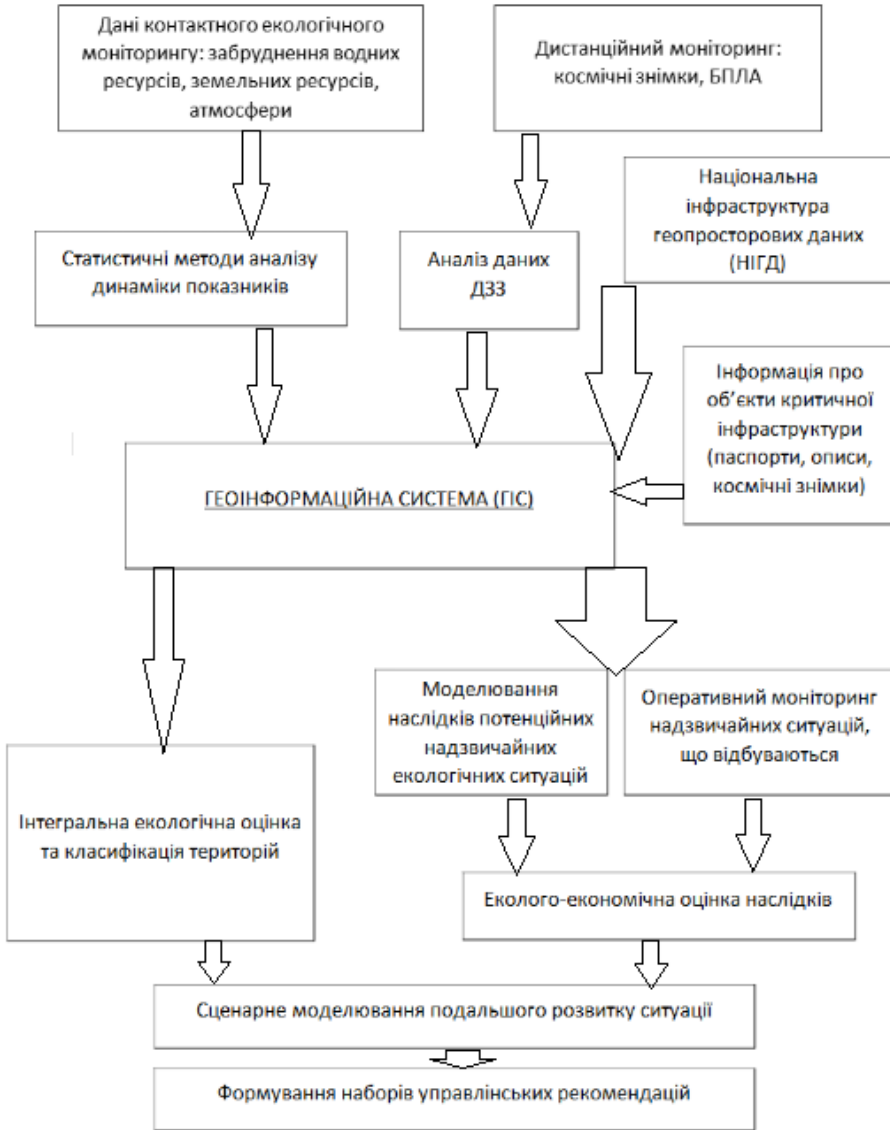


Рис. 1. Концептуальна модель системи інформаційної підтримки прийняття рішень в сфері екологічного управління на основі ГІС-технологій

Центральною складовою інфраструктури інформаційної підтримки рішень є геоінформаційна платформа. Сучасні геоінформаційні програмні продукти мають максимально широкий набір інструментів для аналітичної роботи з геопросторовими даними по більшості з необхідних користувачу СППР задач, наприклад, синтез геомоделей конкретних екосистем, як в [24–26], проведення екологічної оцінки [27], моделювання та прогнозування обстановки в морських екосистемах [28], моделювання та оцінка наслідків надзвичайних екологічних ситуацій, як, наприклад, наслідки знищення Каховської гідроелектростанції [29] або припинення видобутку мінеральних ресурсів у гірничовидобувних регіонах без належних заходів з консервації місць видобутку [30].

Висновки

Розробка систем підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки та природокористування є складною, але важливою проблемою. Виклики є багатогранними, включаючи технічні, методологічні, етичні та соціальні аспекти. Вирішення цих проблем потребує мультидисциплінарного підходу, активного залучення зацікавлених сторін і постійного вдосконалення технологій і методологій. Геопросторові дані та ГІС є незамінними компонентами сучасних екологічних систем підтримки прийняття рішень. Їхня здатність керувати, аналізувати та візуалізувати дані з просторовою прив'язкою значно підвищує здатність СППР вирішувати складні екологічні проблеми. Незважаючи на те, що розробка та впровадження СППР на основі ГІС пов'язані з кількома проблемами, поточний технологічний прогрес та інноваційні підходи обіцяють подолати ці перешкоди.

Майбутнє екологічних СППР полягає в повному використанні потенціалу геопросторових технологій, їх інтеграції з іншими передовими інструментами та залученні різноманітних зацікавлених сторін до процесу прийняття рішень. Завдяки цьому є можливість розробити більш ефективні, справедливі та стійкі рішення для управління природними ресурсами нашої планети та забезпечення екологічної безпеки для майбутніх поколінь. Незважаючи на труднощі, потенційні переваги СППР у покращенні процесу прийняття екологічних рішень є суттєвими. Надаючи керовану даними науково обґрунтовану інформацію, ці системи можуть допомогти управлінцям і практикам орієнтуватися в складнощах управління навколишнім середовищем, зрештою сприяючи більш стійкому та ефективному управлінню довкіллям. Триваюча еволюція СППР, зумовлена досягненнями в галузі обробки даних, штучного інтелекту та моделювання навколишнього середовища, обіцяє подолання поточних обмежень і відкриття нових можливостей для екологічної безпеки та природокористування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Systems Analysis & Design Methods / J.L. Whitten, L.D. Bentley, V.M. Barlow (1989). Boston: Irwin, 1989. – 797 p.
2. Довгий С.О., Бідюк П.І., Трофимчук О.М., Савенков О.І. (2011) Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень. Київ. Наукова думка. 608 с.
3. Бідюк П.І. (2005) Проектування інформаційних СППР. К.: НТУУ “КПІ”. – 121 с.
4. Довгий С.О., Бідюк П.І., Трофимчук О.М. (2014) Системи підтримки прийняття рішень на основі статистично-ймовірнісних методів. Київ: Логос. 420 с.
5. Stair R.M. (1996) Principles of Information Systems. – Washington: ITPC, – 656 p.
6. Триснюк В.М. (2016) Система управління екологічною безпекою природних і антропогенно-модифікованих геосистем. Системи обробки інформації. – №12. – С. 185–188.
7. Лялько В.І., Довгий С.О., Трофимчук О.М. та ін. (2001) Інформатизація аерокосмічного землезнавства. ЦАКІЗ ІГН НАНУ. Київ, Наукова думка, – 606 с.
8. Довгий С.О., Красовський Г.Я., Радчук В.В., Трофимчук О.М., Андреев С.М. (2010). Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря: монографія. ІТГІП НАНУ. Київ, Інформ.системи, – 260 с.

9. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду / Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України; Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ : Супрун В.П., 2021. – 343 с. // ISBN 978-617-7468-53-9.
10. Красовський Г.Я., Радчук В.В., Загородня С.А. (2016) Інформаційні ресурси інтерактивної системи підтримки рішень з питань управління екологічною безпекою українського сектору Чорного моря. *Наук. журнал Геоінформатика*, Київ, №1 (57), С. 57–65.
11. Греков Л.Д., Красовський Г.Я., Трофимчук О.М. (2007) Космічний моніторинг забруднення земель техногенним пилом. Київ. Наукова думка. 219 с.
12. Довгий С.О., Красовський Г.Я., Радчук В.В., Трофимчук О.М. та ін. (2018) Геомоделі в завданнях еколого-економічних оцінок земель. Монографія. К.: ТОВ “Видавництво “Юстон” – 256 с.
13. Пашенко Р.Е., Радчук В.В., Красовський Г.Я. та ін. (2013) Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA. Київ, ІТГП НАНУ. – 316 с.
14. Триснюк В.М., Охарев В.О., Триснюк Т.В., Сметанін К.В., Курило А.В. Створення системи мобільного екологічного моніторингу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: науково-технічний журнал. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (ІФНТУНГ); Івано-Франківськ: Симфонія форте. – 2018, №2 (18) – С. 120–128.
15. Trofymchuk O. M., Krasovsky, G. Y., Radchuk, V. V., Trysnyuk, V. M., Radchuk, I. V., Kreta, D. L., Zagorodnya, S. A., Sheviakina, N. A., Okhariev, V. O., Trysnyuk, T. V., Shumeiko, V. O., Atrasevych, O. V., & Vishnyakov, V. Y. (2019). Експедиційні дослідження параметрів екологічного стану затоки Бакота. *Екологічна безпека та природокористування*, 30(2), 44–55. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.2.44-55>
16. T. Trysnyuk, V. Okhariev, Y. Holovan. (2020) Monitoring system of land resources pollution by oil. *Geoinformatics 2020 – XIXth International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*.
17. Триснюк В.М., Охарев В.О., Триснюк Т.В., Голован Ю.М. (2020) Система екологічного моніторингу забруднення педосфери нафтопродуктами // *Екологічна безпека та природокористування*, №2 (34), – С. 22–29.
18. V. Okhariev, V. Trysnyuk, Y. Anpilova, T. Trysnyuk. (2020) Environmental monitoring based on aerospace and terrestrial researches. XIVth International Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, 10–13 Nov. 2020, Kyiv, Ukraine.
19. Мандрик, О., Охарев, В., Триснюк, Т., & Михайлюк, Р. (2022). Моніторинг забруднення басейну Дністра внаслідок підтоплень та інших надзвичайних ситуацій. *Екологічна безпека та природокористування*, 43(3), 35–42. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.35-42>
20. Миронцов, М. Л., & Охарев, В. О. (2021). Інформаційна система підтримки управлінських рішень для завдань раціонального природокористування та екологічної безпеки. *Екологічна безпека та природокористування*, 37(1), 69–82. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.69-82>
21. V. Okhariev. (2020) Improvement of statistical method for environmental monitoring datasets interpretation. 13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 10-13 Nov 2020, Kyiv, Ukraine.
22. М. Myrontsov, О. Karpenko, О. Trofymchuk, V. Okhariev (2021) Increasing vertical resolution in electrometry of oil and gas wells. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 101–117 ISBN 978-3-030-69188-2.

23. Myrontsov, M., Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Lebid, O., & Okhariev, V. (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>
24. О.М. Трофимчук, В.М. Триснюк, Є.С. Анпілова, В.О. Охарев та ін. Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування: колективна монографія. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2022 – 212 с. ISBN 978-617-7468-53-9.
25. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018. P. 61–67.*
26. O. Trofymchuk, V. Okhariev, M. Myrontsov, Y. Anpilova, V. Trysnyuk (2021). Transdisciplinary analytical system for support the environmental researches. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 319–331. ISBN 978-3-030-69188-2
27. Загородня, С., Новохацька, Н., Охарев, В., Попова, М., Радчук, І., Триснюк, Т., Шумейко, В., & Атрасевич, О. (2018). ГІС-оцінка антропогенного впливу в лімнологічних екосистемах Західного Полісся. *Екологічна безпека та природокористування*, 26(2), 23–33. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.2.23-33>
28. Щипцов, О., Гордєєв, А., Лебідь, О., Охарев, В., Теличко, Р., Федосєнков, С., & Шундель, О. (2023). Інформаційні технології в задачах автоматизації моделювання та прогнозування гідрфізичної обстановки в акваторії Чорного моря. *Екологічна безпека та природокористування*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>
29. Лебідь, О., Охарев, В., Федосєнков, С., Шундель, О., Теличко, Р., & Клименков, О. (2023). Геоінформаційні технології екологічного моніторингу акваторії Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС. *Екологічна безпека та природокористування*, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144>
30. O. Trofymchuk, Y. Yakovliev, Y. Anpilova, V. Okhariev, M. Myrontsov (2021). Ecological situation of post-mining regions in Ukraine. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 293–306. ISBN 978-3-030-69188-2.

Стаття надійшла до редакції 16.01.2024 і прийнята до друку після рецензування 29.03.2024

REFERENCES

1. Whitten, J.L., Bentley, L.D., & Barlow V.M. (1989). *Systems Analysis & Design Methods*. Boston: Irwin.
2. Dovhyi, S.O., Bidyuk, P.I., Trofymchuk, O.M., & Savenkov. O.I. (2011). *Methods of forecasting in decision making support systems*. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
3. Bidyuk, P.I. (2005). *Development of information systems*. Kyiv: NTUU KPI [in Ukrainian].
4. Dovhyi, S.O., Bidyuk, P.I., & Trofymchuk, O.M. (2014). *Decision making support systems based on statistic and probabilistic methods*. Kyiv: Logos [in Ukrainian].
5. Stair, R.M. (1996). *Principles of Information Systems*. Washington: ITPC.
6. Trysnyuk, V.M. (2016). Environmental safety management system of natural and anthropogenically modified geosystems. *Information processing systems*, 12, 185-188 [in Ukrainian].
7. Lyalko, V.I., Dovgyi, S.O., & Trofymchuk, O.M. (2001). *Informatization of aerospace earth science*. NASU Aerospace Research Center. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
8. Dovgyi, S.O., Krasovskyi, G.Y., Radchuk, V.V., Trofymchuk, O.M., & Andreev, S.M. (2010). *Modern information technologies of environmental monitoring of the Black Sea: monograph*. ITGIS NASU. Kyiv, Inform.sistemy [in Ukrainian]

9. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund. Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine; Ivano-Frankivsk national technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. ISBN 978-617-7468-53-9 [in Ukrainian].
10. Krasovskyi, G.Y., Radchuk, V.V., & Zarorodnia, S.A. (2016). Information resources of the interactive decision support system on environmental safety management of the Ukrainian sector of the Black Sea. *Sciences Journal of Geoinformatics*, 1 (57), 57-65 [in Ukrainian].
11. Grekov, L.D., Krasovsky, G.Y., & Trofymchuk, O.M. (2007). Space monitoring of land pollution by man-made dust. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
12. Dovgyi, S.O., Krasovskyi, G.Y., Radchuk, V.V., & Trofymchuk, O.M. (2018). Geomodels in tasks of ecological and economic assessments of lands. Monograph. Kyiv: LLC "Yuston Publishing House" [in Ukrainian].
13. Pashchenko, R.E., Radchuk, V.V., Krasovskyi, G.Y. et al. (2013). Environmental monitoring using NOAA satellite space-based images. Kyiv, ITGIS NASU [in Ukrainian]
14. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Smetanin, K.V., & Kurylo, A.V. (2018). Development of the mobile environmental monitoring system. *Environmental Safety and Sustainable Natural Resource Management: scientific and technical journal*, 2(18), 120-128 [in Ukrainian].
15. Trofymchuk, O.M., Krasovsky, G.Y., Radchuk, V.V., Trysnyuk, V.M., Radchuk, I.V., Kreta, D.L., Zagorodnya, S.A., Sheviakina, N.A., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Shumeiko, V.O., Atrasevych, O.V., & Vishnyakov, V.Y. (2019). Expeditionary studies of parameters of the ecological state of Bakota Bay. *Environmental Safety and Sustainable Natural Resource Management: scientific and technical journal*, 30(2), 44–55. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.2.44-55> [in Ukrainian].
16. Trysnyuk, T., Okhariev, V., & Holovan, Y. (2020). Monitoring system of land resources pollution by oil. In *Geoinformatics 2020 – XIXth International Conference Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*.
17. Trysnyuk, V.M., Okharev, V.O., Trysnyuk, T.V., & Holovan, Y.M. (2020). System of ecological monitoring of pedosphere pollution by petroleum products. *Environmental Safety and Natural Resources*, 34(2), 22–29. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.2.22-29> [in Ukrainian].
18. Okhariev, V., Trysnyuk, V., Anpilova, Y., & Trysnyuk, T. (2020). Environmental monitoring based on aerospace and terrestrial researches. In *XIVth International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 10–13 Nov. 2020, Kyiv, Ukraine.
19. Mandryk, O.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., & Mykhailyuk, R.Y. (2022). Monitoring of Dniester watershed pollution by reason of flooding and other environmental disasters. *Environmental Safety and Natural Resources*, 43(3), 35–42. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.35-42> [in Ukrainian].
20. Myrontsov, M.L., & Okhariev, V.O. (2021). Information system of decision making support for sustainable natural resource management and environmental safety. *Environmental Safety and Natural Resources*, 37(1), 69–82. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.69-82> [in Ukrainian].
21. Okhariev, V. (2020). Improvement of statistical method for environmental monitoring datasets interpretation. In *13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 10-13 Nov 2020, Kyiv, Ukraine.
22. M. Myrontsov, O. Karpenko, O. Trofymchuk, V. Okhariev (2021). Increasing vertical resolution in electrometry of oil and gas wells. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 101-117. ISBN 978-3-030-69188-2.

23. Myrontsov, M., Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Lebid, O., & Okhariev, V. (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>
24. Trofymchuk, O.M., Trysnyuk, V.M., Anpilova, E.S., Okhariev, V.O. et al. (2022). Geoinformational research of water ecosystems of Ukraine: monitoring and forecasting: collective monograph. Ivano-Frankivsk: V.P. Suprun. ISBN 978-617-7468-53-9 [in Ukrainian].
25. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V. & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare, UTPRESS ISSN 1582-0548*, 1, 2018, 61–67.
26. O. Trofymchuk, V. Okhariev, M. Myrontsov, Y. Anpilova, V. Trysnyuk (2021). Transdisciplinary analytical system for support the environmental researches. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 319-331. ISBN 978-3-030-69188-2.
27. Zagorodnya, S., Novokhatska, N., Okhariev, V., Popova, M., Radchuk, I., Trysnyuk, T., Shumeiko, V., & Atrasevych, O. (2018). GIS assessment of anthropogenic impact in the limnological ecosystems of the Western Polissia. *Environmental Safety and Natural Resource*, 26(2), 23–33. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.2.23-33> [in Ukrainian].
28. Shchypstov, O., Gordeev, A., Lebid, O., Okharev, V., Telichko, R., Fedoseyenko, S., & Shundel, O. (2023). Information technologies in the tasks of automation of modeling and forecasting of the hydrophysical situation in the Black Sea water area. *Environmental Safety and Natural Resource*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103> [in Ukrainian].
29. Lebid, O., Okhariev, V., Fedoseyenko, S., Shundel, O., Telychko, R., & Klymenkov, O. (2023). Geoinformation technologies for environmental monitoring of the Black Sea water area after the destruction of the Kakhovska HPP. *Environmental Safety and Natural Resource*, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144> [in Ukrainian].
30. O. Trofymchuk, Y. Yakovliev, Y. Anpilova, V. Okhariev, M. Myrontsov (2021). Ecological situation of post-mining regions in Ukraine. *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems. Decision and Control Springer, Cham*, p. 293-306. ISBN 978-3-030-69188-2.

The article was received 16.01.2024 and was accepted after revision 29.03.2024

Охарев Вячеслав Александрович

кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу природних ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

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

Підсадній Сергій Григорович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

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

УДК 502.51:504.5

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

Dmytro Mosiichuk, postgraduate
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3864-1019> **e-mail:** deusplus@gmail.com

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

INFORMATION SYSTEMS OF OBSERVATION OF MARINE WATERS AND ADJACENT AREAS USING REMOTELY PILOTED AIRCRAFT

Abstract. *The work is dedicated to the solution of the scientific and practical task, which consists in the development of methods, technologies and means of creating systems of complex monitoring of marine water areas and the state of coastal zones using UAVs to improve the quality, efficiency, complexity and effectiveness of the processes of data collection, processing, transmission, preservation and analysis of information about the state of the territory and its environmental safety.*

It was established that the peculiarities of the research are the combination of the complexity of the methodology of building a dynamic system for monitoring sea water areas and the state of coastal zones, their forecasting and prevention in order to ensure the safety and conditions of sustainable development of the territories and the country in general. The main information base of the study consists of satellite data and data obtained using UAVs regarding emergency situations and the state of marine water areas. A characteristic feature of the proposed methodology is the newly introduced structural elements for determining the composition of on-board equipment, determining the number of UAVs and determining the optimal route of movement of an unmanned aerial vehicle in accordance with the environmental task.

It has been proven that the methods of mathematical and simulation modeling for building functional and informational models; methods of theory and practice of system analysis to establish structural connections between elements of complex systems. The cartographic method of researching objects of the state of marine water areas and coastal zones will include cartographic modeling of the subject of research and allows for regional analysis of the spatial structure of geoeological phenomena and the determination of their ecological criteria.

On the basis of the application of the load-bearing equipment on board the UAV, proposals have been implemented regarding the quality assessment and control of environmental parameters when solving the tasks of ecological monitoring of the state of marine water areas and coastal zones.

Key words: *information technology, ecosystem, marine water areas, software trajectory, control system, control algorithms, spectral channels, remote methods.*

Т.В. Триснюк, Д.І. Мосійчук

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

ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЙ ТА ПРИЛЕГЛИХ ЗОН З ВИКОРИСТАННЯМ ДИСТАНЦІЙНО ПІЛОТОВАНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

***Анотація.** Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання, що полягає в розробці методів, технологій та засобів створення систем комплексного моніторингу морських акваторій та стану прибережних зон з використанням ДПЛА для підвищення якості, оперативності, комплексності та ефективності процесів збирання даних спостережень, оброблення, передавання, збереження та аналізу інформації про стан території та її екологічну безпеку.*

Встановлено, що особливостями дослідження є поєднання комплексності методології побудови динамічної системи моніторингу морських акваторій та стану прибережних зон, їх прогнозування та попередження задля забезпечення безпеки та умов сталого розвитку території і країни загалом. Основну інформаційну базу дослідження складають супутникові дані та дані, отримані з використанням БПЛА, щодо надзвичайних ситуацій та стану морських акваторій. Характерною рисою запропонованої методики є нововведені структурні елементи для визначення складу бортового обладнання, визначення кількості ДПЛА та визначення оптимального маршруту руху безпілотного апарата відповідно до виконання поставленого екологічного завдання.

Доведено, що методи математичного й імітаційного моделювання для побудови функціональних і інформаційних моделей; методи теорії та практики системного аналізу для встановлення структурних зв'язків між елементами складних систем. Картографічний метод дослідження об'єктів стану морських акваторій та прибережних зон включатиме картографічне моделювання предмету дослідження та дозволяє проводити регіональний аналіз просторової структури геоекологічних явищ та визначення їх екологічних критеріїв.

На основі застосування несучої апаратури на борту ДПЛА реалізовано пропозиції щодо якісної оцінки та контролю параметрів навколишнього середовища при вирішенні завдань екологічного моніторингу стану морських акваторій та прибережних зон.

***Ключові слова:** інформаційні технології, екосистема, морські акваторії, програмна траєкторія руху, система керування, алгоритми керування, спектральні канали, дистанційні методи.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.130-141>

Вступ

Використання високороздільних космічних знімків та сучасних програмних засобів обробки, а також мобільних екологічних комплексів надає можливість отримувати інформацію щодо стану морських акваторій та прибережних зон. Цей підхід дозволяє створювати базу даних цифрових тематичних карт і статистичних даних різного рівня, сприяючи підвищенню рівня екологічної безпеки морських суден та техногенних об'єктів прибережних зон.

Одним з перспективних методів екологічного моніторингу є дистанційний підхід, що ґрунтується на комплексному використанні космічних, повітряних та рухомих наземних систем спостереження. При цьому важливим елементом розглядають дистанційно пілотовані літальні апарати.

З урахуванням антропогенного впливу на природу та постійних змін в навколишньому середовищі, спричинених промисловими об'єктами та параметрами атмосфери Землі, виникає потреба в надійному виконанні завдань екологічного прогнозування та забезпеченні екологічної безпеки за допомогою екологічного моніторингу. Розширення можливостей екологічного моніторингу стає можливим завдяки використанню рухомих екологічних комплексів, дистанційно пілотованих літальних апаратів і космічних систем спостереження. Це здійснюється шляхом застосування дистанційних методів контролю параметрів стану критичної інфраструктури та вдосконалення науково-методичного апарату оцінки стану зон екологічного ризику.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основною проблемою, яку необхідно дослідити, є обробка програм навігаційного забезпечення ДПЛА, які дозволять їм виконувати польоти у складі групи або вибрати альтернативні маршрути і здійснити взаємодію з пунктом управління. Надходження на ДПЛА спеціалізованих даних дозволить виділяти найбільш важливі відомості про об'єкти морських акваторій та прибережних зон, що дасть змогу істотно скоротити обсяг даних при передачі на інші літальні апарати або наземні пункти управління.

В Україні основними науковцями в області космічних досліджень ґрунтів являються: Лялько В.І. – спектральні характеристики рослинного покриву [1, 2], Попов М.О. – прогнозування врожайності зернових культур за багатоспектральними даними ДЗЗ [3], Трофимчук О.М., Красовський Г.Я., Греков Л.Д. – космічний моніторинг забруднення земель [4, 5], Панас Р.М. – космічний моніторинг деградації ґрунтів [6].

Мета роботи. Метою дослідження є підвищення рівня екологічної безпеки стану морських акваторій та прибережних зон за рахунок удосконалення технологічного процесу та устаткування бортового обладнання дистанційно пілотованого літального апарата.

Об'єктом дослідження є процес застосування дистанційно пілотованих літальних апаратів в системі екологічного моніторингу стану морських акваторій та прибережних зон. З огляду на все вищесказане, можна виділити основні завдання досліджень:

- розробка і вдосконалення системи автоматичного розпізнавання різних об'єктів (з урахуванням рішення найпростіших завдань, в тому числі і автоматичне категорювання різних об'єктів морських акваторій та прибережних зон);

- забезпечення надійного радіозв'язку ДПЛА з пунктом управління (наземним або повітряним);

- надання ДПЛА властивостей, що дозволяє враховувати зміни стану морських акваторій та прибережних зон при виконанні завдань в автономному режимі;

- розробка бортової системи обробки інформації, яка могла б з усього потоку надходження на ДПЛА спеціалізованих даних виділяти найбільш важливі відомості про об'єкти, що дозволить істотно скоротити обсяг даних при передачі на інші літальні апарати або наземні пункти управління.

Крім того, необхідно на підготовчому етапі здійснити:

- метрологічне забезпечення систем керування ДПЛА;
- калібрування бортових систем ДПЛА.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для забезпечення якісного та своєчасного екологічного моніторингу стану морських акваторій та прибережних зон за допомогою дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА) розглядається можливість використання комбінованого підходу. Цей підхід включає наступні етапи:

1. Виділення району спостереження та отримання його характерних особливостей: на цьому етапі визначається область, яку слід спостерігати, та отримуються характеристики цього району.

2. Вибір бортового обладнання ДПЛА: на другому етапі здійснюється вибір обладнання для ДПЛА. Це обладнання повинне дозволити просторово виявити та визначити розміри зон ураження з більш детальним врахуванням висотного профілю атмосферної зони.

3. Передача інформації з ДПЛА: на третьому етапі проводиться передача зібраної інформації з ДПЛА для подальшої обробки та аналізу.

Важливо враховувати, що такий підхід має свої обмеження, пов'язані з можливостями бортового обладнання, яке може не завжди надавати достовірну інформацію для екологічного моніторингу. Структура системи моніторингу навколишнього середовища і екологічно небезпечних техногенних об'єктів повинна виконувати ряд функцій, зокрема збір та обробка інформації, моделювання фізико-хімічних процесів, оцінка стану геоекосистем, прогнозування та зворотний зв'язок для оптимізації інформаційних потоків.

Синтез системи мобільного екологічного моніторингу стану морських акваторій та прибережних зон з використанням аерокосмічних технологій передбачає створення таких її підсистем:

1. Підсистема збору та експрес-аналізу даних стану морських акваторій та прибережних зон.

2. Підсистема первинної обробки і накопичення даних стану морських акваторій та прибережних зон.

3. Підсистема комп'ютерного картографування.

4. Підсистема оцінки стану атмосфери.

5. Підсистема оцінки стану прибережних зон.

6. Підсистема оцінки рівня екологічної безпеки і ризику для здоров'я населення території.

7. Підсистема ідентифікації причин порушення екологічного та санітарного стану.

8. Підсистема інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

Характерною рисою запропонованої методики є нововведені структурні елементи для визначення складу бортового обладнання, визначення кількості ДПЛА та визначення оптимального маршруту руху безпілотного апарата відповідно до виконання поставленого екологічного завдання (рис. 1).

На сьогодні до типового комплексу системи управління польотом ДПЛА включають такі підходи:

- комплекс управління польотом, що дозволяє реалізувати як безпосереднє управління ДПЛА, так і автономний рух за маршрутом;
- забезпечення заданої точності прив'язки, а також можливість визначення координат (заражених об'єктів, епіцентрів, периметрів районів тощо) відповідно до заданої погрішності спостереження;
- можливість реалізації проходження по заданому маршруту руху ДПЛА відповідно до польотного завдання;
- змінність бортової апаратури для ефективного застосування і експлуатації ДПЛА по можливості вирішення екологічних завдань та виявлення антропогенного впливу на довкілля;



Рис. 1. Підготовчі роботи для моніторингу морських акваторій та визначення оптимального маршруту руху безпілотного апарата відповідно до виконання поставленого завдання (2024 р.)

- керованість системи управління ДПЛА по дальності дії;
- згладжування перехідних процесів в системі управління, що не повинно призводити до помітних погіршень, а час перехідного процесу має бути мінімальним;
- відповідність заданим перешкодам захищеному управлінню ДПЛА, для забезпечення можливості застосування безпілотних авіаційних комплексів в умовах складної електромагнітної обстановки (рис. 2).



Рис. 2. Обстеження морських акваторій за допомогою дрона (2024 р.)

При використанні ДПЛА в ході проведення екологічного моніторингу стану морських акваторій для ефективної їх експлуатації виникає питання про вибір раціонального варіанта рішення, а також найбільшого ефекту в заданому діапазоні умов використання.

Допустимо, що є різні варіанти рішень задачі (наприклад, різні системи моніторингу земної поверхні) B_1, B_2, \dots, B_m та сукупність умов їх впровадження (відповідно до заданого маршруту польоту ДПЛА): A_1, A_2, \dots, A_n .

Нехай W_{ij} – показник ефективності (ймовірність здобуття необхідної інформації про земну поверхню) при використанні i -го рішення (i -го варіанта бортового устаткування) в j -х умовах (1, 2). Складемо матрицю стратегій (табл. 1).

Таблиця 1. Матриця стратегій виконання завдання екологічного моніторингу морських акваторій та прилеглих зон

Варіанти рішень	Варіанти умов								
	A_1			A_2			A_3		
	1	...	n	1	...	m	1	...	L
B_1	W_{11}	...	W_{1n}	W_{11}	...	W_{1m}	W_{11}	...	W_{1l}
B_2	W_{21}	...	W_{2n}	W_{21}	...	W_{2m}	W_{21}	...	W_{2l}
....
B_k	W_{k1}	...	W_{kn}	W_{k1}	...	W_{km}	W_{k1}	...	W_{kl}

Особливістю матриці стратегій є побудова різних варіантів рішень залежно від побудови різних систем та пристроїв бортового обладнання ДПЛА. В цьому випадку W_{ϵ} – значення ефективного варіанта використання бортового обладнання (ймовірність здобуття необхідної інформації про приземну поверхню) при застосуванні варіантів рішень залежно від умов.

Для наочності можна побудувати для кожного з гіпотетичних варіантів рішень діаграму залежності між значеннями показників ефективності і варіантами умов. По осі ординат визначаємо значення показника ефективності W , а по осі абсцис – варіанти умов у вигляді крапок, розташованих в певному порядку. З'єднаємо точки W_{ij} , відповідні цьому рішенню, лініями (рис. 3). Отримаємо типовий для практики випадок, коли одне рішення ефективніше в одних умовах, а інше – в інших. Однак з економічних міркувань не можна дозволити собі мати багаточисельні технічні рішення і використовувати кожне у відповідних випадках. Потрібно вибрати якийсь одне рішення (інколи декілька), яке було б кращим, в якомусь сенсі, для всього діапазону умов використання.

У ряді випадків виникає завдання визначення вірогідності або частоти появи тих або інших умов p_1, p_2, \dots, p_n і вибору того рішення, для якого усереднений показник W_i буде кращим

$$W_i = p_1 W_{1i} + p_2 W_{2i} + \dots + p_n W_{ni} \tag{1}$$

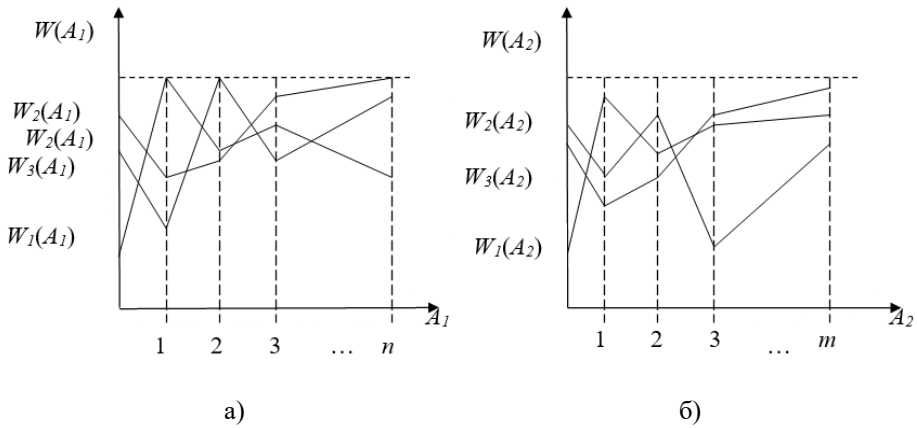


Рис. 3. Графік залежності бортового обладнання ДПЛА для проведення екологічного моніторингу: а – для бортових систем управління ДПЛА, б – для систем спостереження ДПЛА

Якщо вірогідність $p_j (j = 1, \dots, n)$ відома і не змінюється в часі, то саме так і слід робити. Проте набути значень p_j з дослідів у низці випадків неможливо. Крім того, якщо в середньому кращим виявиться один з варіантів рішення і ми його приймемо, то може виявитися, що цей варіант технічного рішення ефективний лише в певних умовах функціонування ДПЛА. В результаті ж рішення виявиться ефективним на дуже короткий час.

Отже, краще вибрати таке компромісне рішення, яке може бути, навіть не будучи оптимальним, в окремих діапазонах умов застосування, і задовольнило б нас на всьому діапазоні умов. Найкраще рішення ґрунтується на аналізі всієї матриці ефективності з врахуванням прогнозу зміни умов застосування бортових систем ДПЛА.

Сформулюємо основні характерні завдання бортових систем ДПЛА і визначимо показники ефективності їх виконання. Одним з основних завдань є визначення координат об'єктів спостереження, що раптово з'являються. При цьому положення цих об'єктів може характеризуватися відповідними статистичними характеристиками невизначеності.

Показником ефективності (виконання завдання) може бути приріст ймовірності недопущення економічних втрат або математичного очікування збережених ресурсів, що визначається в результаті обробки відповідної інформації. Ймовірність недопущення втрат і математичне очікування збережених ресурсів з врахуванням відповідного інформаційного забезпечення можна записати в такому вигляді:

$$W_{нбс} = W_n W(бс), \tag{2}$$

$$m_c^{(a\bar{n})} = m_c W^{(a\bar{n})}, \tag{3}$$

де W_f , m_c – ймовірність недопущення втрат і математичне очікування збережених ресурсів, що надходять з бортових систем, до складу якого входить ДПЛА;

$W^{(a\bar{n})}$ – ймовірність виконання завдання моніторингу бортовими системами ДПЛА щодо отримання і обробки відповідної інформації.

При цьому, ймовірність виконання завдання бортовими системами ДПЛА можна визначити за формулою повної ймовірності (3).

Таким чином, ефективний варіант щодо рішення виконання завдання екологічного моніторингу буде розраховуватися за виразом:

$$W = \sum_{i=1}^3 W_i(A_i) p_i = W_1(A_1) p_1 + W_2(A_2) p_2 + W_3(A_3) p_3, \quad (4)$$

де $W_1(A_1)$ – показник ефективності застосування необхідного бортового обладнання в системі управління ДПЛА (залежно від необхідного);

$W_2(A_2)$ – показник ефективності застосування необхідного бортового обладнання для виконання завдання спостереження ДПЛА;

$W_3(A_3)$ – показник ефективності застосування алгоритму руху ДПЛА по заданому маршруту;

p_i – ймовірність виконання поставленого завдання.

Одним з основних завдань є визначення координат об'єктів спостереження, що раптово з'являються. При цьому положення цих об'єктів може характеризуватися відповідними статистичними характеристиками невизначеності (4).

У такому випадку ймовірність виконання завдання бортовими системами ДПЛА можна визначити за виразом

$$W_2 = \sum_{i=1}^m W_i P_{em}, \quad (5)$$

де W_i – ймовірність виконання завдання моніторингу бортовими системами ДПЛА щодо отримання і обробки відповідної інформації.

Час проведення екологічного моніторингу ДПЛА і передачі даних можна визначити за виразом (6)

$$T = T_c + T_{об} + T_{np}, \quad (6)$$

де T_c – час зйомки бортовими системами ДПЛА;

$T_{об}$ – час первинної обробки інформації на борту;

T_{np} – час передачі даних з ДПЛА на НПУ.

При цьому, ймовірність виконання проведення ЕМ із застосуванням ДПЛА буде залежати від ймовірності виявлення (визначення) антропогенного впливу під час зйомки (7)

$$P_{em} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \frac{1}{\langle t_{ос} \rangle} e^{-\frac{t}{\langle t_{ос} \rangle}} \left[\Phi \left(\frac{t - m_T}{\sqrt{2D_T}} \right) + \Phi \left(\frac{m_T}{\sqrt{2D_T}} \right) \right] dt, \quad (7)$$

де $\Phi(\dots)$ – функція Крампа (інтеграл ймовірності);

m_T – математичні очікування зйомки;

D_T – дисперсії випадкових величин зйомки;

t_{ov} – середній час поширення отруйної речовини в середовищі.

Істотною особливістю процесів функціонування бортових систем ДПЛА є їх випадковість, яка викликана неповною визначеністю умов, в яких ці процеси протікають, а також різними випадковими відхиленнями і помилками, що виникають при зборі інформації, виробленні дій, що управляють, та їх виконанні. Отже, результат функціонування бортових систем ДПЛА є стохастичним і з кількісного боку характеризується законами розподілу параметрів, що визначають цей результат.

Тому на початку досліджень необхідно визначитися з можливістю виконання екологічних завдань ДПЛА, що будуть застосовуватися для проведення екологічного моніторингу. Для виконання поставленого завдання в ході проведення екологічного моніторингу за допомогою ДПЛА потрібно врахувати умови функціоналу

$$f = \{ \tau, P, N, C \}, \quad (8)$$

де τ – час виконання ДПЛА поставленого завдання для виконання екологічного моніторингу ($\tau = \frac{T}{N} \rightarrow \min$ при $T = T(N_1, N_2, \dots, N_n) \rightarrow \min$);

P – ймовірність виконання поставленого завдання ДПЛА в ході проведення

ЕМ ($P = \prod_{i=1}^n P(N_i) \rightarrow \max$);

N – кількість ДПЛА, необхідних для виконання поставленого завдання ЕМ

($N = \sum_{i=1}^n N_i \rightarrow \min$);

C – вартість, яка необхідна для застосування ДПЛА при виконанні

поставленого завдання ЕМ ($C = \sum_{i=1}^n C(N_i) \rightarrow \min$).

Доступність урбаністичних ландшафтів для дистанційних спостережень різна і залежить насамперед від виду, якості, часу, масштабу зйомки, тобто від усіх параметрів. Більшість характеристик ландшафту – рельєф, рослинність, ґрунти, поверхневі води, явища антропогенної діяльності й техногенні об'єкти – добре відображаються на аеро- та космічних знімках у різних спектральних діапазонах або на синтезованих зображеннях. Усі вони утворюють зовнішній вигляд ландшафту, його фізіономічні ознаки (рис. 4).



Рис. 4. Чергування різних структур і типів стану морських акваторій та прилеглих зон за даними ДПЛА

На основі отриманих результатів розроблено науково-практичні рекомендації, у яких запропоновано послідовно виконувати дії для виділення техногенного забруднення та визначення стану критичної інфраструктури за допомогою ДПЛА, що дозволяє оперативно приймати управлінські рішення для зменшення негативних впливів та забезпечення екологічної безпеки регіону.

Висновки

Під час проведення дослідження були відпрацьовані науково-методичні підходи, на основі яких удосконалено процедуру проведення екологічного моніторингу з використанням ДПЛА, яка є основою оперативного виявлення забруднювачів в ході проведення спостереження за заданою територією. У роботі при вирішенні поставлених наукових завдань комплексно використовувалися: метод спостереження (польові дослідження), системний підхід та методи структурного та параметричного аналізу, теорія і методи оптимізації, теорія управління та методи статистичної обробки результатів. В якості проведення експерименту разом з аналітичними розрахунками використовувалось імітаційне моделювання, на основі використання спеціального програмного комплексу MatLab 8.1. були сформульовані і розглядалися завдання оптимального польоту ДПЛА за економічними показниками. Також вибір маршруту польоту ДПЛА, формування критерію оптимального польоту ДПЛА, а також автоматичне управління польотом в роботі розкрито. Це спонукає також до низки майбутніх досліджень, таких як:

- визначення схем вимірювальних систем, що дозволяють реалізувати ефективно застосування ДПЛА;
- формування управління ДПЛА як автономної функціонуючої системи з обмеженими ресурсами, яка враховує жорсткі специфічні обмеження;
- ефективно вживання ДПЛА в умовах зміни послідовності польоту.

Встановлено, що можливості використання ДПЛА та ефективність їх застосування можуть оцінюватися наступними узагальненими і частковими показниками (виявлення антропогенної зони, вірогідність виконання поставленого завдання, часовий ресурс виконання поставленого завдання спостереження, оцінювання виконання поставленого завдання спостереження, а також оцінювання функціонування авіаційних систем):

- вірогідність виконання типових завдань моніторингу стану критичної інфраструктури (виявлення);
- вірогідність стійкого управління ДПЛА в розрахункових умовах протягом всього польоту;
- точність навігації;
- точність визначення координат зараженого об'єкта (території);
- дальність дій;
- діапазон висот і швидкостей його застосування;
- час виконання завдання екологічного моніторингу.

Запропоновано аналітичну модель оцінювання якості виконання екологічних завдань моніторингу засобами ДПЛА, особливістю якої є пошук структури за оптимальними параметрами бортового обладнання літального апарата з урахуванням особливостей визначення характеру антропогенного впливу на стан критичної інфраструктури.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Красовський Г.Я., Трофимчук О.М., Крета Д.Л., Клименко В.І., Пономаренко І.Г., Суходубов О.О. Синтез картографічних моделей забруднення земель техногенним пилом з використанням космічних знімків // Екологія і ресурси. – К.: ПНБ, 2005. – №12. – С. 37–55.
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. [2013] Mathematical and GIS-modeling of landslides in kharkiv region of Ukraine. *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling*. – Springer, Berlin, Heidelberg. 347-352.
3. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду / Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України; Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ : Супрун В.П., 2021. – 343 с. // ISBN 978-617-7468-53-9.
4. Машков О.А.; Триснюк В.М.; Мамчур Ю.В.; Жукаускас С.В.; Нігородова С.А.; Курило А.В. Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: наук.-техн. журн. – Івано-Франківськ : Симфонія форте. – 2019. № 1. (19) 2019. С. 69–77. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/162108/03-Mashkov.pdf?sequence=1>
5. Триснюк В.М. Система управління екологічною безпекою природних і антропогенно-модифікованих геосистем. Системи обробки інформації. – 2016. – №12. – С. 185–188. Index Copernicus
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., Radlowska, K.O. [2019] Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.
7. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin. Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018. P. 61–67.*

8. Zaitsev S. V. Method of estimating reliability of information transmission in wireless networks channels increase in noise and interference / S. V. Zaitsev // International Journal «Information Models and Analyses». – Sofia : ITHEA, 2015. – Vol. 4 (1). – P. 87–99.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2024 і прийнята до друку після рецензування 14.05.2024

REFERENCES

1. Krasovsky, G.Ya., Trofymchuk, O.M., Kreta, D.L., Klymenko, V.I., Ponomarenko, I.G., & Sukhodubov, O.O. (2005). Synthesis of cartographic models of land pollution by man-made dust using space images. *Ecology and resources*, 12, 37-55 [in Ukrainian].
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. In *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347-352). Springer, Berlin, Heidelberg.
3. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund. Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine; Ivano-Frankivsk national technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. ISBN 978-617-7468-53-9 [in Ukrainian].
4. Mashkov, O.A., Trysnyuk, V.M., Mamchur, Y.V., Zhukauskas, S.V., Nigorodova, S.A., & Kurylo, A.V. (2019). A new approach to the synthesis of restorative control for remotely piloted aerial vehicles for environmental monitoring. *Environmental safety and balanced resource use: science and technology journal*, 1(19), 69-77 [in Ukrainian].
5. Trysnyuk, V.M. (2016). Environmental safety management system of natural and anthropogenically modified geosystems. *Information processing systems*, 12, 185-188 [in Ukrainian].
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., & Radlowska, K.O. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, Extended Abstracts.
7. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare*, 1, 61–67.
8. Zaitsev, S.V. (2015). Method of estimating reliability of information transmission in wireless networks channels increase in noise and interference. *International Journal «Information Models and Analyses»*, 4 (1), 87–99.

The article was received 21.02.2024 and was accepted after revision 14.05.2024

Триснюк Тарас Васильович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу прикладної інформатики Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com

Мосійчук Дмитро Іванович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3864-1019> **e-mail:** deusplus@gmail.com

УДК 502.51:504.5:338.49

Lidiia Horoshkova¹, Doctor of Economical Sciences, Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7142-4308> **e-mail:** goroshkova69@gmail.com

Anna Bakurova², Doctor of Economical Sciences, Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6986-3769> **e-mail:** abaka111060@gmail.com

Alexander Sumets¹, Doctor of Economical Sciences, Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7116-3857> **e-mail:** sumets.alexander@gmail.com

Vasyl Trysnyuk³, Doctor of Technical Sciences, Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Viktor Shumeiko³, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0285-4566> **e-mail:** shym1983@ukr.net

¹National University of «Kyiv-Mohyla Academy», Kyiv, Ukraine

²Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine

³Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODELING OF TRANSPORT AND LOGISTICS INFRASTRUCTURE FOR THE POST-WAR RECONSTRUCTION OF UKRAINE

Abstract. *The paper is dedicated to addressing the scientific and practical task of expanding the utilization of inland water transport and increasing the variety of transport and logistic alternatives with the aim of creating a more efficient and resilient logistics system in Ukraine.*

Based on the analysis of the state of river ports, unloading terminals, and docks within the overall river infrastructure of Ukraine and their connectivity to land transport networks, ports were selected that could be used for establishing logistic zones based on them. An assessment of the level of transport accessibility of ports in the Dnipro, Danube, and Southern Bug river basins was carried out, and the corresponding graph was constructed. The Gephi software, which has open-source code for visualizing and analyzing graphs of large networks, was used to construct the graph. Assessments of the accessibility level of the port network were also conducted using the Kenig number and relative indicators: Bavelash and Boshe indexes.

The research results have shown that in conditions of a state of war, occupation of maritime space, and destruction of a significant amount of the country's infrastructure, there is a necessity to create a network model of transport logistics using navigable sections of the Dnipro and Southern Bug rivers and the "Danube – Black Sea" navigation route to ensure national security and sustainable functioning of Ukraine's economy. There is a need to expand this system further and connect it to the Rhine-Danube corridor. To address security challenges, it is necessary to establish a transport-logistics system that simultaneously utilizes inland waterways, railway, and road transport infrastructure.

Keywords: *port infrastructure, river routes, logistic technologies, transport infrastructure, information technologies.*

Л.А. Горошкова¹, А.В. Бакурова², О.М. Сумець¹, В.М. Триснюк³, В.О. Шумейко³

¹Національний університет «Києво-Могилянська академія», м. Київ, Україна

²Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

³Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ

***Анотація.** Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання розширення використання можливостей внутрішнього водного транспорту та збільшення різноманіття транспортних та логістичних альтернатив з метою створення більш ефективної та стійкої системи логістики в Україні.*

На основі проведеного аналізу стану річкових портів, розвантажувальних терміналів і причалів у загальній річковій інфраструктурі України та їх забезпеченості транспортними мережами суходолу, були обрані порти, які можуть бути використані для організації логістичних зон на їх базі. Була здійснена оцінка рівня транспортної доступності портів в басейнах річок Дніпро, Дунай та Південний Буг і побудований відповідний граф. Для побудови графа застосований програмний продукт Gephi, що має відкритий вихідний код для візуалізації і аналізу графів великих мереж. Також були проведені оцінки рівня доступності мережі портів з використанням числа Кеніга та відносних показників: індексів Бавелаша та Бошема.

Результати досліджень показали, що в умовах воєнного стану, окупації морського простору, руйнування значної кількості інфраструктури країни, з метою забезпечення національної безпеки та сталого функціонування економіки України існує необхідність створення мережевої моделі транспортної логістики з використанням судноплавних ділянок річок Дніпро та Південний Буг та суднового ходу «Дунай – Чорне море» з можливістю подальшого розширення цієї системи і доєднання до коридору Рейн-Дунай. Задля вирішення безпекових завдань існує необхідність у створенні транспортно-логістичної системи, яка одночасно забезпечує можливості використання внутрішніх водних шляхів, інфраструктури залізничного та автомобільного транспорту.

***Ключові слова:** портова інфраструктура, річкові шляхи, логістичні технології, транспортна інфраструктура, інформаційні технології.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.142-156>

Вступ

На сьогодні в умовах війни внаслідок блокування більшості морських портів України особливої уваги потребує проблема розширення використання можливостей внутрішнього водного транспорту. Ще до початку повномасштабної війни Уряд України розглядав розвиток річкового транспорту як важливий елемент підтримки національної економіки через збільшення різноманіття транспортних та логістичних альтернатив з метою створення більш ефективної та стійкої системи логістики. Крім того, розвиток річкового транспорту, який сприяє «зеленим» перевезенням, також може суттєво вплинути на соціальний розвиток та екологічну ситуацію в Україні. На

сьогодні внаслідок підриву греблі Каховської ГЕС використання судноплавних шляхів річки Дніпро є обмеженим, обмеженими є також можливості використання річки Південний Буг. Одночасно з цим є усі підстави розширювати використання річки Дунай. Але вже сьогодні в контексті завдань повоєнного відновлення країни існує необхідність формування оновленої транспортно-логістичної мережі України, яка буде включати річковий транспорт з одночасним залученням інфраструктури автомобільних і залізничних сполучень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З урахуванням прагнення України стати членом Європейського Союзу, виникає необхідність у розвитку логістичної інфраструктури країни. З огляду на це, поза увагою дослідників не залишається аналіз річкової інфраструктури і її основних елементів – річкового транспорту і річкових портів. За останні роки досить інтенсивно досліджувалися вітчизняними вченими Городовою А. і Одинець Т., Іртищевою І. і Бойко Є. [2], Огороковим А., Вернигорою Р. і Цупровим П. [3], Сліпенко А. і Манаєнко І. [4], Тимошук О. і Горошко К. [5], Шаховим А. й ін. [6] проблеми і перспективи розвитку річкової галузі, стану річкової інфраструктури і річкового транспорту, потенціалу річкової галузі. Але з початком війни умови і можливості використання річкового транспорту суттєво змінилися, крім того, вже сьогодні є зрозумілими завдання для повоєнного відновлення країни та її інфраструктури. Саме ці питання потребують уваги і додаткових наукових досліджень.

Мета роботи. Метою роботи є розробка комплексної системи логістичного управління використанням судноплавних внутрішніх водних шляхів України як складової Транс'європейської транспортної мережі в Україні та розробка мережевої моделі транспортно-логістичної інфраструктури, що одночасно враховує можливості водного, залізничного та автомобільного сполучення задля забезпечення геопросторового розвитку країни та її національної безпеки.

Виклад основного матеріалу дослідження

Нами були проведені дослідження щодо фактичної чисельності діючих на цей момент часу річкових портів, розвантажувальних терміналів і причалів у загальній річковій інфраструктурі України та їх забезпеченості транспортними мережами суходолу. Було доведено, що для практичної організації логістичних зон на базі цих портів доцільно обрати такі річкові порти: Ізмаїл, Рені, Київський, Запорізький, Миколаївський, Дніпровський, Херсонський і Новокаховський. Обрані річкові порти мають топологічну прив'язку до конкретних регіонів і можливість бути інтегрованими в регіональні розподільчі логістичні центри. У таблиці 1 наведені основні техніко-технологічні параметри цих портів.

Таблиця 1. Основні техніко-технологічні параметри найбільших річкових портів

Порт	Площа території, Га	Потужність порту, млн тонн/рік	Довжина причалів, м	Глибина річки біля причалу, м
1. Дніпровський річковий порт	20,8	10,0	1 346,0	3,0-4,0
2. Запорізький річковий порт	39,7	6,0	2 786,0	3,5-4,0
3. Київський річковий порт	18,0	30,0 (+10,0)	1 479,0	3,0
4. Новокаховський річковий порт	8,82	1-й причал – 459 т/добу; 2-й причал – 1369 т/добу; 3-й причал – 2608 т/добу	1 200,0	3,4-3,8
5. Річковий порт Ізмаїл	1 294 126 м ²	8,50	4 841,0 24 причали (2 618,6 м), користується 19 причалами 2182,73 п. м.	7,5
6. Річковий порт Рені	Спеціальна економічна зона – 943,6 тис. м ²	Максимальна виробнича потужність порту з урахуванням нафтоналивних вантажів складає 12,3 млн тонн (14,5), максимально досягнута у 1989 р. – 10,5 млн тонн	3 936,0	6,8 (2-7,5)
7. Миколаївський річковий порт	56,62	5,0	919,1	4,5-5,5 (7,6-8,5 на рейді)

Джерело: складено авторами.

На рисунках 1–8 – космічні знімки територій портів, отримані за даними комерційного космічного угруповання США – компанії Махаг, космічних апаратів WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3, GeoEye-1.



Рис. 1. Космічний знімок порту Рені



Рис. 2. Космічний знімок порту Ізмаїл



Рис. 3. Космічний знімок порту Миколаїв



Рис. 4. Космічний знімок порту Херсон

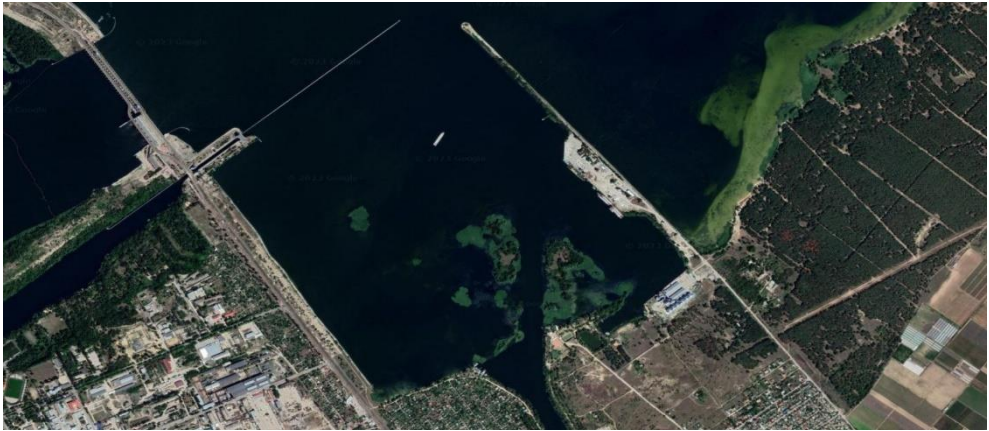


Рис. 5. Космічний знімок порту Нова Каховка



Рис. 6. Космічний знімок порту Запоріжжя



Рис. 7. Космічний знімок порту Дніпро



Рис. 8. Космічний знімок порту Київ

Задля вирішення поставлених завдань було проведено дослідження стану транспортно-логістичної інфраструктури України, а саме визначення забезпеченості річкових портів України іншими транспортними мережами суходолу.

На рис. 9 наведена схема розміщення морських і річкових портів на логістичному полігоні України. На рис. 10 та 11 наведені основні мережі автомобільних шляхів України та залізничного сполучення.

У табл. 2 наведені результати аналізу доступності найбільших річкових портів до транспортної мережі суходолу. Фактично було проаналізовано наявність залізничного і автомобільного транспорту поблизу або у межах порту та визначено значення показника (коефіцієнта) з використанням теорії графів.

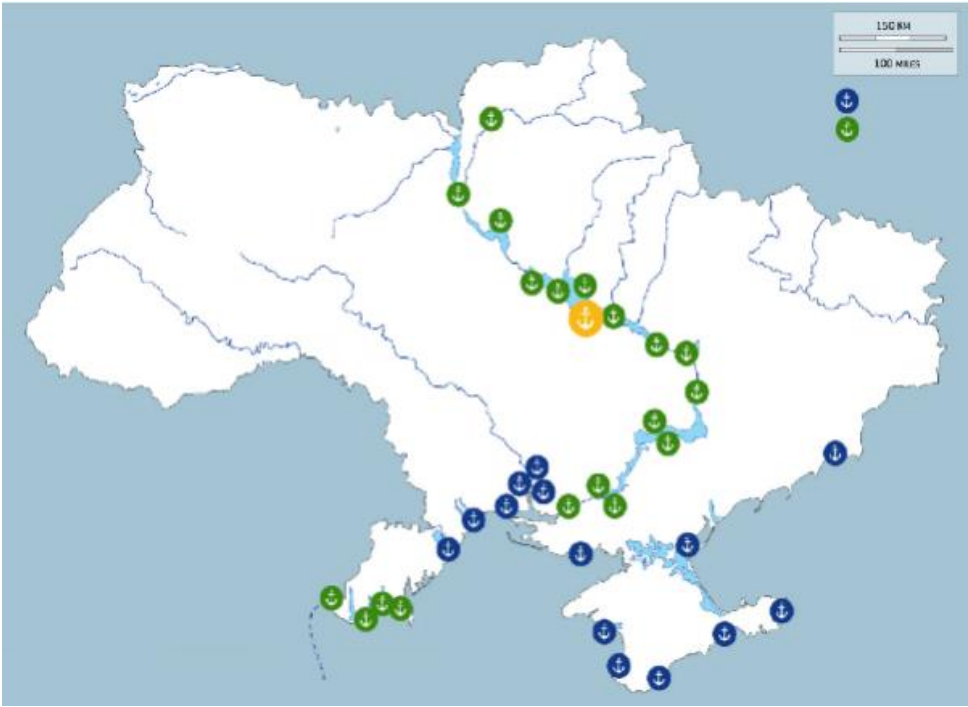


Рис. 9. Схема розміщення морських і річкових портів на логістичному полігоні України [7]

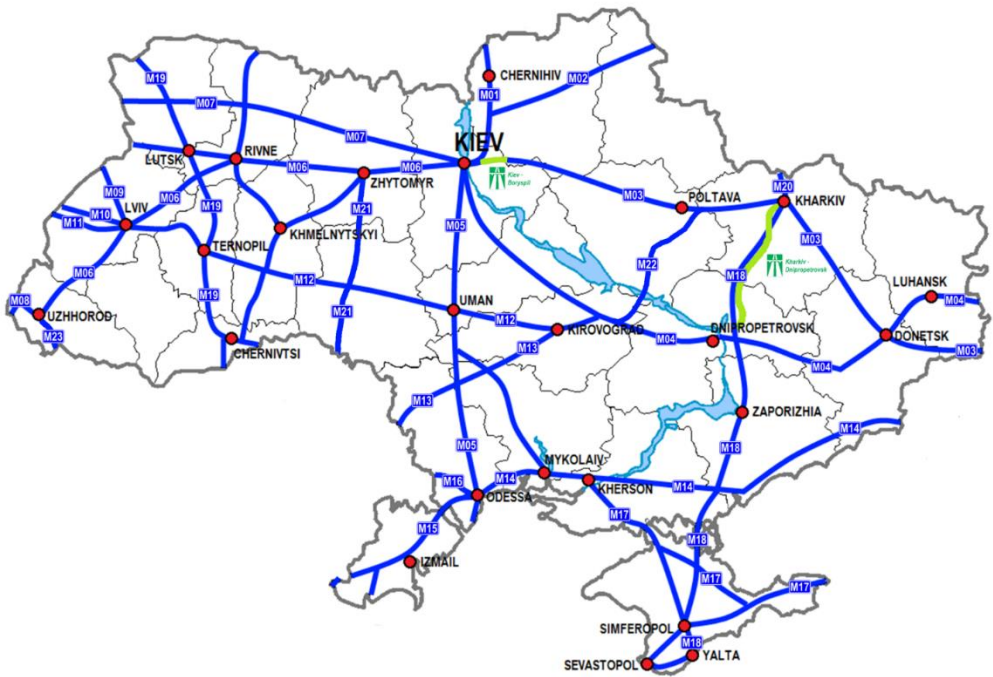


Рис. 10. Схема автомобільних шляхів на логістичному полігоні України [8]



Рис. 11. Схема шляхів залізничного сполучення в Україні [9]

Результати аналізу, що у систематизованій формі наведені в табл. 2, надали можливість встановити, що найкраща доступність до транспорту на цей момент часу є для річкових портів (порядок вказано за рівнем зниження рівня доступності) – Київського, Ренійського, Миколаївського, Запорізького, Дніпровського, Новокаховського та Ізмаїльського.

Для оцінки рівня транспортної доступності зазначених портів була розглянута система міст, що є річковими портами в басейнах річок Дніпро, Дунай та Південний Буг, та визначені відстані між ними для автомобільного сполучення за допомогою ресурсу: <https://della.com.ua/distance/?cities=5231,208>.

У відповідності з географічними особливостями території країни вказані вище водні об'єкти (порти, термінали, причали) розміщені на прийнятних для здійснення економічно ефективних перевезень вантажів відстанях (табл. 3).

З метою побудови графа була побудована матриця суміжності за наявності прямих магістральних автодоріг між портовими містами на карті України (табл. 4).

Для побудови графа застосований програмний продукт Gephi, що має відкритий вихідний код для візуалізації і аналізу графів великих мереж. Gephi використовує механізм 3D-рендерінга для відображення графів в режимі реального часу та прискорення досліджень: The Open Graph Viz Platform. <https://gephi.org/>.

Таблиця 2. Доступність до транспортної мережі суходолу найбільших річкових портів

Порт	Наявність транспорту поблизу або у межах порту		Значення показника (коефіцієнта) доступності, %
	автомобільний	залізничний	
1. Дніпровський річковий порт	+ (транзит вантажівок через центр міста)	+ (залізничне сполучення з трьома станціями)	0,9
2. Запорізький річковий порт	+ (транзит вантажівок через центр міста)	+ (залізнична станція «Порт «Велике Запоріжжя»)	0,9
3. Київський річковий порт	+ (зручний під'їзд для габаритного автотранспорту)	+ (три колії – 2419 м, фронт навантажень 50 вагонів, ваговий комплекс)	1,0
4. Новокаховський річковий порт	- (близько 2 км до міжнародної траси М14)	- (відсутнє залізничне сполучення, найближча залізнична станція на відстані 2 км)	0,3
5. Річковий порт Ізмаїл	+	- (наявна колія без електрифікації)	0,6
6. Річковий порт Рені	+	- (наявна колія без електрифікації)	0,6
7. Миколаївський річковий порт	+	+	1,0

Джерело: складено авторами.

Таблиця 3. Відстань між річковими портами, терміналами, причалами автошляхами, км

Портові міста	р.Дніпро				
	Київ	Дніпро	Запоріжжя	Нова Каховка	Херсон
Київ	0	473	570	780	844
Дніпро	473	0	97	307	371
Запоріжжя	570	97	0	210	274
Нова Каховка	780	307	210	0	64
Херсон	844	371	274	64	0
Ізмаїл	719	826	780	529	459
Рені	781	786	875	591	521
Миколаїв	967	494	397	187	123

Продовження таблиці 3

Портові міста	р. Дунай		р. Південний Буг
	Ізмаїл	Рені	Миколаїв
Київ	719	781	967
Дніпро	826	786	494
Запоріжжя	780	875	397
Нова Каховка	529	591	187
Херсон	459	521	123
Ізмаїл	0	69	391
Рені	69	0	464
Миколаїв	391	464	0

Таблиця 4. Матриця суміжності портових міст за автошляхами (магістральними автодорогами) з вагою зав'язків 1

Портові міста	р. Дніпро					р. Дунай		р. Південний Буг
	Київ	Дніпро	Запоріжжя	Нова Каховка	Херсон	Ізмаїл	Рені	Миколаїв
Київ	0	1	0	0	0	0	0	1
Дніпро	1	0	1	0	0	0	0	1
Запоріжжя	0	1	0	1	0	0	0	0
Нова Каховка	0	0	1	0	1	0	0	0
Херсон	0	0	0	1	0	0	0	1
Ізмаїл	0	0	0	0	0	0	1	1
Рені	0	0	0	0	0	1	0	0
Миколаїв	1	1	0	0	1	1	0	0

Розмір вершини на рисунку відповідає її ступеню зв'язності, тобто кількості інцидентних ребер (рис. 12).

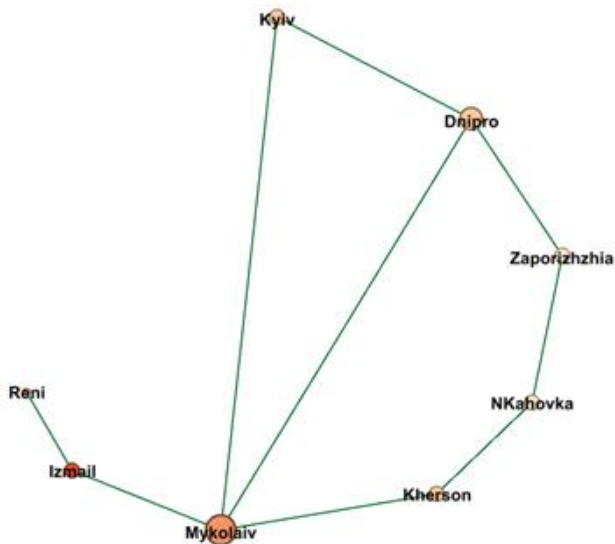


Рис. 12. Граф транспортної доступності найбільших річкових портів України

Статистика для графу є такою:

- 1) Середній зважений ступінь вершин 2,25;
- 2) Діаметр графа 4;
- 3) Щільність 0,32;
- 4) Середня довжина шляху 2,036 (довжиною шляху в графі між парою вершин називається кількість ребер між відповідними вершинами).

Розрахуємо індекси доступності для випадку, коли вага зв'язку дорівнює 1, тобто вказує на наявність прямого автошляху між портами.

Абсолютний індекс доступності вершини (дорівнює сумі всіх відстаней до інших вершин графа) та число Кеніга (що дорівнює максимальній відстані між відповідними вершинами). Для цього будуємо матрицю найкоротших відстаней між кожною парою вершин графа (табл. 5).

Таблиця 5. Матриця найкоротших відстаней між вершинами графа

Портові міста	р.Дніпро					р.Дунай		р.Південний Буг
	Київ	Дніпро	Запоріжжя	Нова Каховка	Херсон	Ізмаїл	Рені	Миколаїв
Київ	0	1	2	3	2	2	3	1
Дніпро	1	0	1	2	2	2	3	1
Запоріжжя	2	1	0	1	2	3	4	2
Нова Каховка	3	2	1	0	1	3	4	2
Херсон	2	2	2	1	0	2	3	1
Ізмаїл	2	2	3	3	2	0	1	1
Рені	3	3	4	4	3	1	0	2
Миколаїв	1	1	2	2	1	1	2	0

Результати розрахунків узагальнені у табл. 6.

Таблиця 6. Результати оцінки транспортної доступності портів

Портові міста	Абсолютний індекс доступності вершини	Число Кеніга	Індекси Бавелаша	Індекси Бошема
Київ	14	3	8,14	0,50
Дніпро	12	3	9,50	0,58
Запоріжжя	15	4	7,60	0,47
Нова Каховка	16	4	7,13	0,44
Херсон	13	3	8,77	0,54
Ізмаїл	14	3	8,14	0,50
Рені	20	4	5,70	0,35
Миколаїв	10	2	11,40	0,70

Отримані результати свідчать про те, що Миколаїв має найменший абсолютний індекс доступності, отже є центральним для даної системи міст, що є річковими портами. Цей висновок підтверджує і мінімальне значення числа Кеніга.

До відносних показників належать індекси Бавелаша та Бошема.

Індекс Бавелаша певної вершини розраховується як частка від сумарного абсолютного індексу доступності за всіма вершинами до індексу абсолютної доступності відповідної вершини. Центральною вершиною вважається вершина з найбільшим значенням індексу, що знову належить Миколаєву.

Для індексу Бошама маємо аналогічний результат. Він показує співвідношення між протяжністю показника абсолютної транспортної доступності та кількістю вершин графа, тобто центрів системи річкових портів.

Отже, як бачимо, Миколаївський порт є найбільш інфраструктурно забезпеченим у системі розглянутих портових міст, оскільки він має сполучення як водним шляхом, так і сухоходом. Найгірша ситуація, на нашу думку, спостерігається щодо портів Рені та Ізмаїл, оскільки тільки в цих портах відсутнє електрифіковане залізничне сполучення з іншими містами. Вже досить тривалий час обговорюється доцільність електрифікації наявної ділянки залізничного сполучення, яку для пасажирського сполучення обслуговують дизельним транспортом. Але, на жаль, це питання є тільки серед планових заходів.

Висновки

Результати досліджень показали, що в умовах воєнного стану, окупації морського простору, руйнування значної кількості інфраструктури країни, з метою забезпечення національної безпеки та сталого функціонування економіки України існує необхідність створення мережевої моделі транспортної логістики. Нагальною є потреба у створенні системи логістичного управління використанням судноплавних внутрішніх водних шляхів, а саме судноплавних ділянок річок Дніпро та Південний Буг та суднового ходу «Дунай – Чорне море» з можливістю подальшого розширення цієї системи і доєднання до коридору Рейн-Дунай. Задля вирішення безпекових завдань існує необхідність в створенні транспортно-логістичної системи, яка одночасно забезпечує можливості використання внутрішніх водних шляхів, інфраструктури залізничного та автомобільного транспорту. Застосування ГІС-технологій та БПЛА, як інструментів оперативного реагування на надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру, підвищать ефективність функціонування такої системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горошко К. О., Аляб'єва О. М. Річковий транспорт як вирішення проблем «зернової логістики». Агросвіт. №24. 2017. С. 49-52. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrosvit_2017_24_10. (дата звернення 20.02.2023).
2. Іртищева І., Бойко Є. Розвиток річкової інфраструктури як елемента аграрної логістики в контексті ресурсозберігаючої політики, 2016. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/163025/32-Irtyshcheva.pdf?sequence=1> (дата звернення: 20.02.2023).
3. Окорочов А. М., Вернигора Р. В., Цупров П. С. Річковий транспорт України: сучасний стан та перспективи використання. Зб. наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2016. Вип. 12. С. 62-68. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2016_12_12 (дата звернення 20.02.2023).

4. Сліпенко А.К., Манаєнко І.М. Розвиток річкового транспорту України в умовах світових тенденцій енергоефективності. Актуальні проблеми економіки та управління. 2019. № 13. URL: <http://ape.fmm.kpi.ua/article/view/167629> (дата звернення: 20.02.2023).
5. Тимошук О. М., Горошко К. О. Європейський досвід забезпечення розвитку річкових судноплавних компаній. Проблеми економіки. 2015. № 4. С. 73-78.
6. Шахов А.В., Росомаха О.І., Росомаха О.А. Річковий транспорт в Україні. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті. 2019. № 3 (68). С. 5-15.
7. Схема розміщення морських і річкових портів на логістичному полігоні України. URL: <https://agravery.com/uk/posts/show/po-dnipru-po-bugu-problemi-i-perspektivi-rozvitku-vodnogo-transportu>
8. Схема автомобільних шляхів на логістичному полігоні України. URL: https://www.wikiwand.com/uk/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%96_%D1%88%D0%BB%D1%8F%D1%85%D0%B8_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8#Media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Ukraine_Major_Roads.png
9. Схема шляхів залізничного сполучення в Україні. URL: <https://megaobzor.net/kartyi-zheleznyih-dorog-ukrainyi/>

Стаття надійшла до редакції 21.03.2024 і прийнята до друку після рецензування 24.05.2024

REFERENCES

1. Horoshko, K.O., Aliabieva, O.M. (2017). Richkovyi transport yak vyrishennia problem «zernovoi lohistyky». *Ahrosvit*, 24, 49-52. Retrieved 20.02.2023 from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrosvit_2017_24_10
2. Irtysheva, I., Boiko, Ie. (2016). Rozvytok richkovoi infrastruktury yak elementa agrarnoi logistyky v konteksti resursozberigaiuchoi polityky. Retrieved 20.02.2023 from: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/163025/32-Irtysheva.pdf?sequence=1>
3. Okorokov, A.M., Vernygora, R.V., Tsuprov, P.S. Richkovyi transport Ukrainy: suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku. *Zb. nauk. prats Dnipropetrovskogo nats. un-tu zaliznychnogo transportu imeni akademika Lazariana*, 12, 62-68. Retrieved 20.02.2023 from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2016_12_12
4. Slipenko, A.K., Manaienko, I.M. (2019). Rozvytok richkovogo transportu Ukrainy v umovakh svitovykh tendentiiy energoefektyvnosti. *Aktualni problemy ekonomiky ta upravlinnia*, 13. Retrieved 20.02.2023 from: <http://ape.fmm.kpi.ua/article/view/167629>
5. Tymoshchuk, O.M., Goroshko, K.O. (2015). Yevropeiskyi dosvid zabezpechennia rozvytku richkovykh sudnoplavnykh kompanii. *Problemy ekonomiky*, 4, 73-78.
6. Shakhov, A.V., Rosomakha, O.I., Rosomakha, O.A. (2019). Richkovyi transport v Ukraini. *Rozvytok metodiv upravlinnia ta gospodariuvannia na transporti*, 3 (68), 5-15.
7. Scheme of Placement of Sea and River Ports on the Logistics Polygon of Ukraine. Retrieved from: <https://agravery.com/uk/posts/show/po-dnipru-po-bugu-problemi-i-perspektivi-rozvitku-vodnogo-transportu>
8. Scheme of Roadways on the Logistics Polygon of Ukraine. Retrieved from: https://www.wikiwand.com/uk/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B1%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%96_%D1%88%D0%BB%D1%8F%D1%85%D0%B8_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8#Media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Ukraine_Major_Roads.png
9. Scheme of Railway Routes in Ukraine. Retrieved from: <https://megaobzor.net/kartyi-zheleznyih-dorog-ukrainyi/>

The article was received 21.03.2024 and was accepted after revision 24.05.2024

Горошкова Лідія Анатоліївна

доктор економічних наук, професор, професор кафедри екології Національного університету «Києво-Могилянська академія»

Адреса робоча: вул. Григорія Сковороди, 2, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7142-4308> **e-mail:** goroshkova69@gmail.com

Бакурова Анна Володимирівна

доктор економічних наук, професор, професор кафедри системного аналізу та обчислювальної математики Національного університету «Запорізька політехніка»

Адреса робоча: вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6986-3769> **e-mail:** abaka111060@gmail.com

Сумець Олександр Михайлович

доктор економічних наук, доцент, старший науковий співробітник Науково-дослідної лабораторії «Науки про Землю» Національного університету «Києво-Могилянська академія»

Адреса робоча: вул. Григорія Сковороди, 2, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7116-3857> **e-mail:** sumets.alexander@gmail.com

Триснюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, професор, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

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

Шумейко Віктор Олександрович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0285-4566> **e-mail:** shym1983@ukr.net

УДК 681.327

Pavlo Kurbet, Postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0612-3859> *e-mail*: tovsba@gmail.com

Oleksandr Rudenok, Postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-6910-1823> *e-mail*: a_rudenok@ukr.net

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

THE METHOD OF PARAMETRIC ADAPTATION OF THE CHECK POLYNOMIALS OF THE COMPONENT RECURSIVE SYSTEMATIC CONVULSION CODE TURBO CODE

***Abstract.** The article is devoted to increasing the efficiency of the functioning of wireless information transmission systems due to the adaptation of the verification polynomials of the component recursive systematic convolutional turbo code by solving the optimization problem using the gradient method. After the appearance of the extremely important work of K. Shannon, huge efforts have been made to find new transmission methods in order to approach the bandwidth of the channel. Channel coding is one of the main methods that enables such operation at almost full bandwidth. The probability of a white error of information decoding is chosen as the objective function. To calculate the probability of a bit error in information decoding, it is proposed to use cyclic codes. Adaptation schemes of these codes are used to improve the characteristics of information reliability. At the same time, during adaptation, in the vast majority of works, only one parameter changes – the coding speed, which does not fully increase the effectiveness of corrective coding schemes. The purpose of the article is to increase the efficiency of wireless information transmission systems by adapting the verification polynomials of the component recursive systematic convolutional turbo code by solving the optimization problem. The article consists of an introduction, which highlights the problem, analyzes the latest research and publications on this topic, and formulates the purpose of the article. The results of the research are shown, conclusions and prospects for further research are drawn. The article ends with a list of used sources. As a result of the proposed method, the effective number of verification polynomials of the RSCC turbo code, which were found using the method for the channel with additive white Gaussian noise for different sizes of the input data block, is given. We consider the direction of further research to expand the search range to take into account a larger number of parameters of turbo codes during adaptation, while the following can be foreseen: the number of bits in a block, types of interleavers, decoding algorithms, decoding iterations, etc.*

***Keywords:** corrective codes, turbo codes, wireless data transmission systems, likelihood functions, adaptation.*

П.М. Курбет, О.А. Руденко

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

МЕТОД ПАРАМЕТРИЧНОЇ АДАПТАЦІЇ ПЕРЕВІРОЧНИХ ПОЛІНОМІВ КОМПОНЕНТНОГО РЕКУРСИВНОГО СИСТЕМАТИЧНОГО ЗГОРТОЧНОГО КОДУ ТУРБО КОДУ

***Анотація.** Стаття присвячена підвищенню ефективності функціонування безпроводових систем передачі інформації за рахунок адаптації перевірочних поліномів компонентного рекурсивного систематичного згорточного коду турбо коду шляхом рішення оптимізаційної задачі методом градієнта. Після появи вкрай важливої роботи К. Шеннона докладені величезні зусилля до пошуку нових методів передачі з метою наближення до пропускної здатності каналу. Канальне кодування є одним із основних методів, які уможливають таку роботу майже на повній пропускній здатності. В якості цільової функції обрана ймовірність бітової помилки декодування інформації. Для розрахунку ймовірності бітової помилки декодування інформації запропоновано використовувати циклічні коди. Для покращення характеристик достовірності інформації використовуються схеми адаптації цих кодів. При цьому при адаптації у переважній більшості робіт змінюється тільки один параметр – швидкість кодування, що неповною мірою підвищує ефективність схем корегуючого кодування. Метою статті є підвищення ефективності функціонування безпроводових систем передачі інформації за рахунок адаптації перевірочних поліномів компонентного рекурсивного систематичного згорточного коду турбо коду шляхом рішення оптимізаційної задачі. Стаття складається із вступу, де висвітлено проблему, проведено аналіз останніх досліджень та публікацій по цій тематиці та сформульовано мету статті. Показано результати дослідження, зроблено висновки та окреслено перспективи подальших досліджень. Завершується стаття списком використаних джерел. Як результат роботи запропонованого методу наведено ефективну кількість перевірочних поліномів РСЗК турбо коду, які були знайдені із застосуванням методу для каналу з адитивним білим гаусівським шумом для різних розмірів вхідного блоку даних. Напрямоком подальших досліджень вважаємо розширення діапазону пошуку для врахування більшої кількості параметрів турбо кодів при адаптації, при цьому можна передбачити наступні: кількість біт в блоці, типи перемежувачів, алгоритми декодування, ітерації декодування і т.д.*

***Ключові слова:** коригуючі коди, турбо коди, безпроводові системи передачі даних, функції правдоподібності, адаптація.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.157-172>

Вступ

Постановка проблеми. На теперішній час безпроводові системи передачі даних поєднують системи мобільного зв'язку та системи безпроводового доступу. Системи мобільного зв'язку пройшли вже 5 поколінь від 1G до 5G, ведеться розробка технологій 6G. До найбільш поширених систем безпроводового доступу відносяться Wi-Fi, Wi-Max, Zig-Bee, інші [1–5].

На сьогоднішній день в світі впроваджуються системи безпроводового доступу за технологією 5G. При цьому, комерціалізація 5G починається приблизно з 2020 року. Передбачається, що 6G буде забезпечувати кращі комунікації для людей і речей (технологія IoT) та охоплюватиме тенденцію розумного суспільства. Крім того, що триває еволюція трьох сценаріїв використання, започаткованих у 5G, штучний інтелект і датчики стануть двома новими сценаріями використання у 6G.

У роботі К. Шеннона у 1948 році показано, що передача даних з малою кількістю помилок по безпроводовому каналу можлива, якщо використовується довгий випадковий завадостійкий (канальний) код [6]. З тих пір були докладені величезні зусилля до пошуку нових методів передачі з метою наближення до пропускної здатності каналу. Канальне кодування є одним із основних методів, які уможливають таку роботу майже на повній пропускній здатності.

В сучасних безпроводових системах передачі даних для підвищення достовірності інформації застосовуються технології адаптивного кодування, OFDM, MIMO.

Так, у стандарті 4G LTE для високошвидкісної передачі інформації використовуються турбо коди в поєднанні з модуляціями ФМ-4, КАМ-16, КАМ-64, а для низькошвидкісної – згорткові та блокові коди. Схема кодера турбо коду включає два рекурсивні систематичні згорткові коди (РСЗК) з довжиною кодового обмеження $K = 4$ та швидкістю кодування $R = 1/2$. Загальна швидкість кодування турбо коду $R = 1/3$. Кожен РСЗК

представляється поліноміальними генераторами виду: $G(D) = \left[1, \frac{g_1(D)}{g_0(D)} \right]$, де

$g_1(D) = 1 + D + D^3$ – поліном прямого зв'язку РСЗК (їх може бути декілька),

$g_0(D) = 1 + D^2 + D^3$ – поліном зворотного зв'язку РСЗК.

Для покращення характеристик достовірності інформації використовуються схеми адаптації цих кодів. При цьому при адаптації у переважній більшості робіт змінюється тільки один параметр – швидкість кодування R , що неповною мірою підвищує ефективність схем корегуючого кодування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [7] представлені узагальнені паралельні конкатеновані блокові коди на основі кодів Ріда-Соломона. Автори пропонують ефективний алгоритм декодування з модифікаціями алгоритму Chase-Pyndiah, написаний з використанням вагового коефіцієнта α та коефіцієнта надійності β . У роботі авторами вивчено вплив різних параметрів турбо коду на характеристики достовірності інформації. Такими параметрами є: різні компонентні коди, розмір перемежувача (кількість підблоків), кількість ітерацій декодування. Результати моделювання показують ефективність використання адаптованих параметрів для декодування узагальнених паралельних конкатенованих блокових кодів на основі кодів Ріда-Соломона. Запропонований алгоритм з використанням адаптованих параметрів має кращі характеристики достовірності, ніж без адаптації.

У статті [8] авторами проведено аналіз ефективності перфорованих турбо кодів (за швидкістю кодування) і перфорованих мультидвійкових турбо кодів

при передачі інформації по каналу з адитивним білим гаусівським шумом (AWGN) в термінах частоти бітових помилок (BER) і частоти помилок кадрів (FER). Розглядаються оригінальні турбо коди, які складаються з паралельної конкатенації двох ідентичних рекурсивних систематичних згорткових кодів (РСЗК) із швидкістю кодування $R = 1/2$. Також розглядаються мультидвійкові турбо коди, які складаються з паралельної конкатенації двох ідентичних РСЗК із швидкістю кодування $R = 2/3$. Щоб досягти високої спектральної ефективності, автори зосереджували увагу на високих швидкостях кодування, тобто на швидкостях $R = 1/2, 3/5$ і $2/3$, та використанні виколювання біт для зміни швидкості кодування. Для сумісності стандартів IEEE 802.11n і DVD-T автори розглядали тільки коди з помірною довжиною блоку даних, тобто 1504 біт у всіх випадках.

У статті [9] автори пропонують використовувати глибоке навчання для декодування турбо кодів та полярних кодів, застосовуючи фіксовану швидкість кодування.

Метою статті є підвищення ефективності функціонування безпроводових систем передачі інформації за рахунок адаптації перевірочних поліномів компонентного рекурсивного систематичного згорткового коду турбо коду шляхом рішення оптимізаційної задачі.

Результати дослідження

Суть адаптації перевірочних поліномів компонентного РСЗК турбо коду у зміні структури та кількості прямих зв'язків компонентних рекурсивних РСЗК турбо кодів, якими генеруються перевірочні біти даних даного турбо коду, для підвищення достовірності передачі інформації.

Особливо потужним серед паралельних конкатенованих кодів є клас багатокомпонентних турбо кодів. Вони чудово підходять для підтримки гібридного автоматичного запиту на повторну передачу (HARQ). Під час першої передачі жодна надлишковість не надається, тому загальна швидкість кодування становить одиницю. Якщо CRC вказує на помилку декодування, передається інша закодована версія тієї самої інформації, в цьому разі декодер тепер має 50% надмірності, а загальна швидкість кодування стає $R = 1/2$. У разі продовженого невдалого декодування CRC передається всього N різних перехресних версій оригінальної інформації, що призводить до загальної швидкості кодування $1/N$.

Кодер SCC складається з зовнішнього кодера (Кодер I) та внутрішнього кодера (Кодер II), які з'єднані перемешувачем. Перемешувач переставляє біти перед їх передачею до іншого компонентного кодера. Це гарантує, що навіть якщо певний біт був значно зашумлений каналом, є ймовірність того, що інший компонентний декодер здатен надати більш надійну інформацію щодо цього біта. У декодері SCC використовується ітеративна обробка і може бути досягнута ефективність, схожа на паралельну конкатенацію. Фактично, послідовна конкатенація представляє собою досить загальну структуру і багато схем декодування/виявлення можуть бути описані як послідовно конкатеновані структури, такі як ті, що використовуються в турбоеквалайзері, кодовій модуляції, декодуванні LDPC. Так само, послідовна конкатенація може містити більше ніж два компоненти.

Однак, з появою технології мобільного зв'язку 5G, швидкості передачі даних значно підвищилися.

Технологія 5G – це технологія мобільного зв'язку нового покоління, призначена для забезпечення більшої місткості і вищих швидкостей передачі даних, ніж попереднє покоління Long Term Evolution (LTE). Технологія 5G забезпечує надзвичайно низьку затримку та надзвичайно високу надійність, що дозволяє інноваційні сервіси у різних галузях промисловості. Згідно з міжнародними стандартами Міжнародного телекомунікаційного союзу (ITU), було ідентифіковано кілька служб застосування 5G. Ці служби включають покращений мобільний доступ до Інтернету (eMBB), масштабну комунікацію типу машин (mMTC), ультранадійну низьку затримку (URLLC) та фіксований безпроводовий доступ. Кожен користувач може отримати мінімальну швидкість передачі даних 100 Мбіт/с з піковою швидкістю передачі даних 20 Гбіт/с.

Очікується, що до 2030 року буде реалізовано підключення 50 мільярдів пристроїв в рамках розвитку Інтернету речей (IoT). Сенсори, приводи, електронні прилади, вуличне освітлення та інші пристрої будуть бездротово підключені до Інтернету та один до одного за допомогою комунікації пристроїв-до-пристроїв (D2D), яка також відома як масштабна комунікація типу машин (mMTC). Інші досягнення будуть потребувати URLLC; ці досягнення включають підключені та автономні автомобілі, повітряні транспортні засоби, віддалене керування роботами в екстремально небезпечних умовах, автоматизацію виробництва в рамках Четвертої промислової революції, віддалену хірургію та додатки розумної мережі.

Сучасні операторські мережі включають велику і дедалі більшу різноманітність апаратних пристроїв. Запуск нових послуг часто вимагає інтеграції складного обладнання, що включає дорогі процедури проектування та асоціюється з тривалим виходом на ринок.

Однак існує певний рівень свободи щодо того, як eNB використовує інформацію для призначення ресурсів.

1. Архітектура 5G має отримувати переваги від спільного розгортання з еволюцією LTE, але потрібно уникати міжсистемних залежностей. У той же час всі основні функціональності RAN мають бути розроблені з урахуванням частот, на яких має працювати новий повітряний інтерфейс, наприклад доступ до системи, мобільність, обробка QoS та охоплення.

2. Архітектура 5G має забезпечувати багаторівневе підключення, включаючи multi-RAT. Очікується, що пристрій може бути підключений до кількох зв'язків того ж самого RAT (наприклад, до макро- та маленьких станцій), а також до різних RAT, включаючи нові RAT та LTE. Це може розширити або використати існуючі технології, такі як об'єднання носіїв та подвійне підключення. Це поєднання RAT також може включати не-3GPP RAT, наприклад, IEEE 802.11ax (високоєфективний Wi-Fi).

3. Архітектура 5G має підтримувати координаційні функції, придатні для вузлів, що підключені через різні категорії зворотного каналу. Це означає, що новий радіоінтерфейс має бути розроблений таким чином, щоб уникнути непотрібних обмежень, що дозволить розгортання з різними функціональними розбиттями. Це є дуже важливим принципом, оскільки координація для скасування завад, наприклад, є частиною «принципів дизайну для 5G», де масивне MIMO та координована передача і прийом (CoMP) наводяться як приклади очікуваних технологій. Цей принцип також стосується нелокальних розгортань розвитку LTE та нових радіо інтерфейсів. Це гарантуватиме, що оператори зі своєю існуючою магістраллю зможуть розгорнути технологію 5G.

4. Архітектура 5G має вбудовану гнучкість для оптимізації використання мережі, одночасно забезпечуючи різноманітність використання бізнес-моделей. Цей принцип передбачає, що та ж логічна архітектура RAN, яка розроблена 3GPP, повинна бути достатньо гнучкою, щоб враховувати випадки використання, пов'язані та не пов'язані з широкосмуговими послугами, наприклад, uMTC, а також різноманітність бізнес-моделей, наприклад, спільне використання мережі. Щодо архітектури RAN та CN, це передбачає, що дизайн протоколів достатньо гнучкий, щоб підтримувати різні вимоги.

5. Архітектура 5G має фреймворк програмованості для стимулювання інновацій. Для підтримки широкого спектру вимог, врахування багатьох варіантів використання (не чітко визначених на момент впровадження 5G) та сприяння швидкій бізнес-інновації, пристрої 5G повинні мати високий рівень програмованості та налаштування, підтримку роботи в різних діапазонах та режимах, агрегацію потоків з різних технологій, ефективність в енергоспоживанні пристроїв та ефективність сигналізації, яка враховує послуги.

Системи мобільного зв'язку працюють під впливом потужних завад природного, промислового та навмисного походження, які значно підвищують помилки в прийнятій з каналу інформації.

Тому постає питання розробки методів зменшення помилок в інформаційних послідовностях в умовах впливу потужних завад.

На рис. 1–4 показані схеми РСЗК турбо кодів із швидкістю кодування $R = 1/2$ при різних значеннях поліномів і кодових обмежень, структура яких має вигляд: $(1, g_1/g_0)$, де g_0 – поліном зворотного зв'язку, а g_1 – поліном прямого зв'язку (на рис. 1 – РСЗК виду $(1, 5/7)$ з кодовим обмеженням $K = 3$, на рис. 2 – РСЗК виду $(1, 13/11)$ з кодовим обмеженням $K = 4$, на рис. 3 – РСЗК $(1, 39/33)$ з кодовим обмеженням $K = 6$, на рис. 4 – РСЗК $(1, 47/43)$ з кодовим обмеженням $K = 6$).

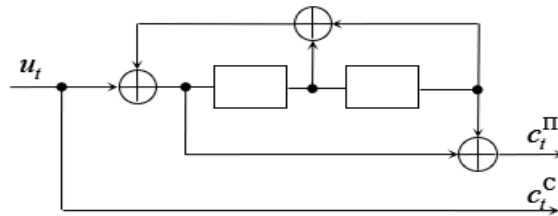


Рисунок 1. Схема рекурсивного систематичного згортного коду при K

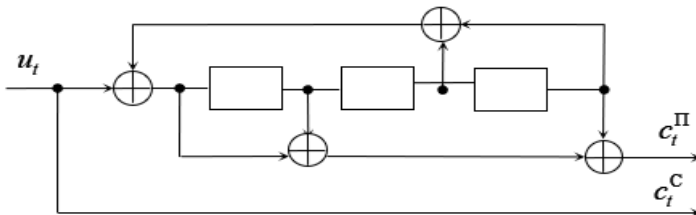


Рисунок 2. Схема рекурсивного систематичного згортного коду при $K = 4$

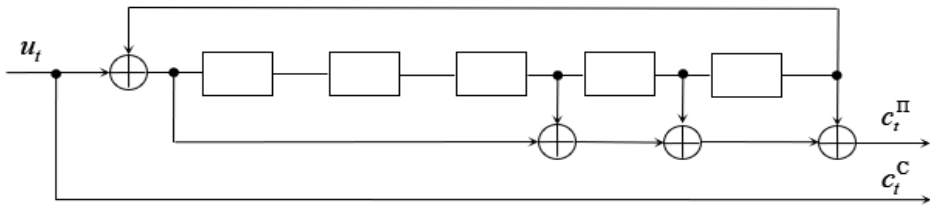


Рисунок 3. Схема рекурсивного систематичного згорточного коду при $K = 6$ виду $(1, 39/33)$

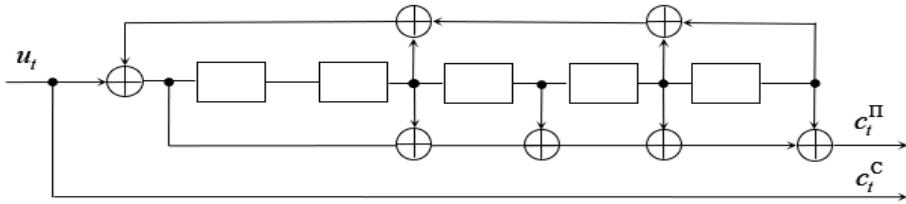


Рисунок 4. Схема рекурсивного систематичного згорточного коду при $K = 6$ виду $(1, 47/43)$

Представлені на даних рисунках РСЗК турбо коду генерують на один вхідний інформаційний біт один перевірочний. Зі збільшенням довжини кодового обмеження коригуючі властивості кодера покращуються, тобто турбо код із РСЗК з $K = 6$ може виправити значно більше помилок, ніж з $K = 3$.

Покращити коригувальні властивості РСЗК при заданій довжині кодового обмеження K можна, додаючи прямі зв'язки в структуру РСЗК (які описуються певними поліномами), що призводить до збільшення кількості перевірочних біт на один вхідний інформаційний символ.

Покажемо такі зміни відповідно до схем РСЗК, наведених вище. Додаємо один додатковий прямий зв'язок до вищевказаних схем РСЗК. При цьому це можна зробити для РСЗК з $K > 3$.

На рис. 5–7 показані схеми РСЗК турбо кодів із швидкістю кодування $R = 1/3$ при різних значеннях поліномів і кодових обмежень, структура яких має вигляд: $(1, g_1 / g_0, g_2 / g_0)$, де g_0 – поліном зворотного зв'язку, а g_1 – перший поліном прямого зв'язку, g_2 – другий поліном прямого зв'язку (на рис. 5 – РСЗК виду $(1, 13/11, 15/11)$ з кодовим обмеженням $K = 4$, на рис. 6 – РСЗК $(1, 39/33, 49/33)$ з кодовим обмеженням $K = 6$, на рис. 7 – РСЗК $(1, 47/43, 53/43)$ з кодовим обмеженням $K = 6$).

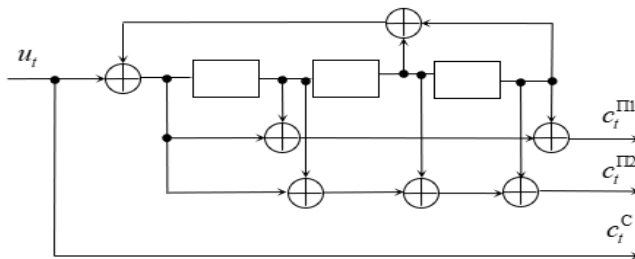


Рисунок 5. Схема рекурсивного систематичного згорточного коду при $K = 4$ виду $(1, 13/11, 15/11)$

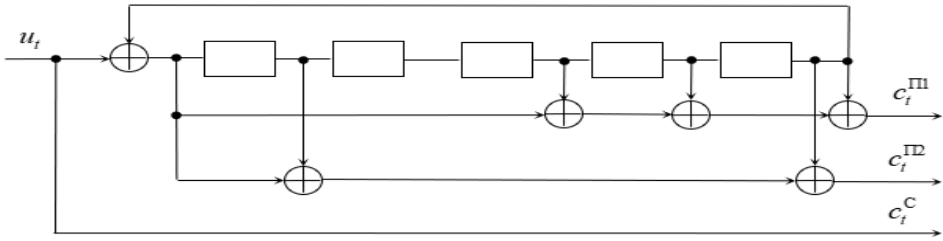


Рисунок 6. Схема рекурсивного систематичного згортчного коду при $K = 6$ виду (1, 39/33, 49/33)

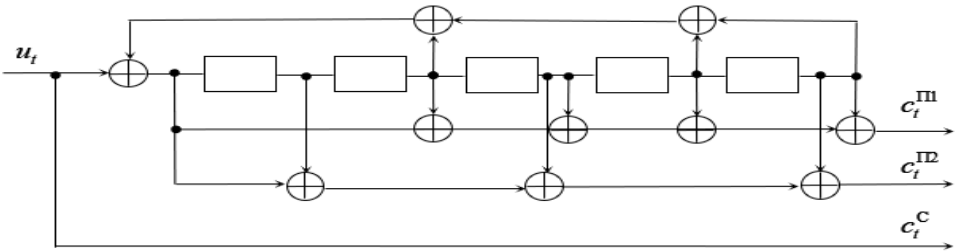


Рисунок 7. Схема рекурсивного систематичного згортчного коду при $K = 6$ виду (1, 47/43, 53/43)

Можна й далі проводити ускладнення РСЗК турбо коду додаванням прямих зв'язків в його структурі, використовуючи відповідні поліноми.

На рис. 8 показана схема РСЗК турбо коду виду (1, 47/43, 53/43, 33/43) з кодовим обмеженням $K = 6$ із швидкістю кодування $R = 1/4$. В цьому випадку структура має вигляд:

$$1, g_1 / g_0, g_2 / g_0, g_3 / g_0,$$

де g_0 – поліном зворотного зв'язку, а g_1 – перший поліном прямого зв'язку, g_2 – другий поліном прямого зв'язку, g_3 – третій поліном прямого зв'язку.

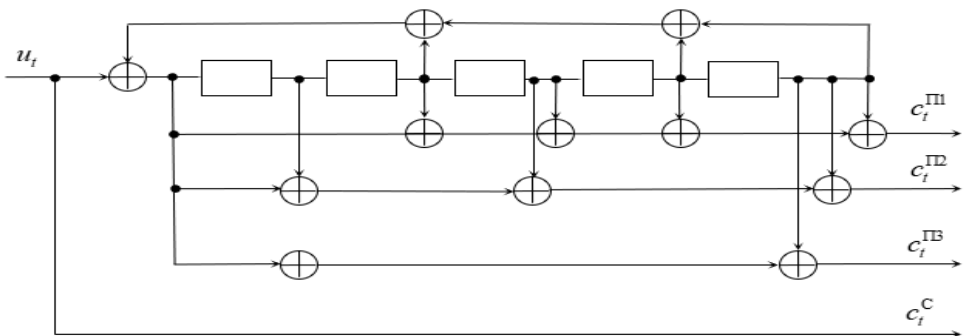


Рисунок 8. Схема рекурсивного систематичного згортчного коду при $K = 6$ виду (1, 47/43, 53/43, 33/43)

Відповідно для цього РСЗК варіант побудови кодера турбо коду буде мати наступний вигляд (рис. 9), де П – пристрій перемеження біт даних.

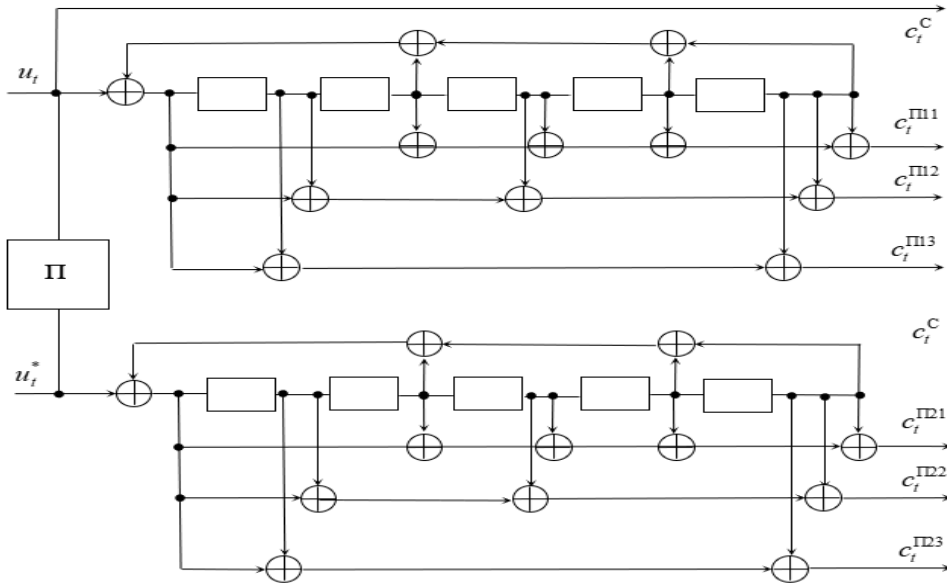


Рисунок 9. Схема кодера турбо кода при використанні двох РСЗК $K = 6$ виду $(1, 47/43, 53/43, 33/43)$

Розглянуті варіанти схем побудови РСЗК використовуються в кодерах турбо кода, а відповідні до кожного кодера решітчасті діаграми – в декодерах при декодуванні за максимумом апостеріорної ймовірності, застосовуючи алгоритм ВСJR або його модифікації.

РСЗК виконує кодування біт даних, використовуючи відповідну ґратчасту діаграму, яка описується поліноміальними генераторами. Із збільшенням порядку полінома збільшується розмір ґратчастої діаграми як 2^M (M – кількість елементів пам'яті РСЗК).

Кодування РСЗК здійснює по діаграмі станів, яка відображає всі можливі стани компонентного РСЗК та всі можливі переходи при подачі на вхід $\{0\}$ або $\{1\}$. Поліноми прямих та зворотних зв'язків впливають на структури діаграми станів.

При декодуванні використовується аналогічна діаграма станів. Розраховуються логарифмічні відношення функцій правдоподібності (ЛВФП) $L(u_k)$ для випадкової двійкової змінної u_k таким чином [10]:

$$L(u_k) \triangleq \log\left(\frac{P(u_k = 1 / y_1^N)}{P(u_k = 0 / y_1^N)}\right). \quad (1)$$

Для декодування використовуються алгоритми за максимумом правдоподібності.

Розглядається РСЗК з кодовою швидкістю $1/q$ (для кожного вхідного біта РСЗК виробляє q біт).

Врахування поліномів та швидкостей кодування відбувається при розрахунку перехідної метрики $\gamma_i(s', s)$ в алгоритмах декодування турбо кодів [11].

$$\begin{aligned}
 \gamma_k(s^1, s) &= B_k \cdot e^{\frac{y_k^{1,s} \cdot x_k^{1,s}}{\sigma_n^2} + \sum_{i=2}^q \frac{y_k^{i,p} \cdot x_k^{i,p}}{\sigma_n^2}} \cdot A_k \cdot e^{\frac{L_a(c_k^1) \cdot c_k^1}{2}} = A_k \cdot B_k \cdot e^{\frac{y_k^{1,s} \cdot x_k^{1,s}}{\sigma_n^2} + \sum_{i=2}^q \frac{y_k^{i,p} \cdot x_k^{i,p}}{\sigma_n^2}} \cdot e^{\frac{L_a(c_k^1) \cdot c_k^1}{2}} = \\
 &= A_k \cdot B_k \cdot \exp \left[\frac{4 \cdot h_0^2}{p} \cdot \left(\frac{y_k^{1,s} \cdot A \cdot c_k^1}{2} + \sum_{i=2}^q \frac{y_k^{i,p} \cdot A \cdot c_k^i}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot L_a(c_k^1) \cdot c_k^1 \right] = \\
 &= A_k \cdot B_k \cdot \exp \left[\frac{1}{2} \cdot L_a(c_k^1) \cdot c_k^1 + \frac{4 \cdot A \cdot h_0^2}{p} \cdot \frac{1}{2} \cdot y_k^{1,s} \cdot c_k^1 \right] \exp \left[\sum_{i=2}^q \left(\frac{4 \cdot A \cdot h_0^2}{p} \cdot \frac{1}{2} \cdot y_k^{i,p} \cdot c_k^i \right) \right] = \\
 &= A_k \cdot B_k \cdot \exp \left[\frac{1}{2} \cdot L_a(c_k^1) \cdot c_k^1 + Lc \cdot \frac{1}{2} \cdot y_k^{1,s} \cdot c_k^1 \right] \exp \left[\sum_{i=2}^q \left(Lc \cdot \frac{1}{2} \cdot y_k^{i,p} \cdot c_k^i \right) \right],
 \end{aligned} \tag{2}$$

Використовуючи (2), можна побачити, що у виразі для перехідної метрики враховані перевіірні символи з урахуванням будь-якої структури РСЗК, які отримуються за рахунок використання прямих та зворотних поліномів РСЗК та швидкості кодування турбо коду.

В якості параметрів адаптації турбо кодів приймаються перевіірні поліноми (прямих зв'язків) $\{g_{11}, \dots, g_{1m}; g_{21}, \dots, g_{2m}; \dots, g_{k1}, \dots, g_{km}\}$ рекурсивних систематичних згорткових кодів (РСЗК).

Ефективність системи передачі інформації з турбо кодами характеризується деяким числовим показником Q , який потрібно в результаті адаптації перетворити на мінімум.

Таким чином, під завданням пошуку розумітимемо віднайдення оптимального значення невідомої функції $Q(x_1, \dots, x_n)$ або таких значень змінних x_1^*, \dots, x_n^* , які відповідають оптимальному значенню функції $Q^* = Q(x_1^*, \dots, x_n^*)$.

Нехай $Q(X)$ – функція, задана у просторі параметрів $X \in G$. Завдання полягає у пошуку мінімального значення функції Q^* і координат точки мінімуму $X^*, Q(X^*) = Q^*$.

Завдання оптимізації полягають у побудові мінімізуючої послідовності $X^0, X^1, \dots, X^r, \dots$ за формулою $X^{r+1} = X^r - a \nabla(X^r)$, де $\nabla(X) \in G$ – градієнт функції $Q(X)$ у точці X .

Нехай задана функція критерію $Q(x_1, \dots, x_n)$ та відомі початкові значення параметрів оптимізації $\{x_i^0, \dots, x_n^0\}$. Потрібно визначити мінімальне значення функції Q та координати точки мінімуму $\{x_1^*, \dots, x_n^*\}$.

Сутність методу розв'язання поставленої задачі оптимізації полягає в наступному.

1. Визначається напрям градієнта функції Q , тобто напрям її найшвидшої зміни, у точці $\{x_2^0\}$.

2. Здійснюється переміщення з точки $\{x_1^0\}$ в точку $\{x_2^1\}$ за напрямом, протилежним напрямку градієнта Q .

3. У точці $\{x_2^1\}$ визначається новий напрям і здійснюється переміщення в точку $\{x_2^i\}$ і т. д. доти, доки не буде виконано деяку умову закінчення пошуку.

Для простоти умовимося, що:

- початкове рішення $\{x_i^0\}$ знаходиться у допустимій області, тобто $x_i^0 \in G, (i = \overline{1, n})$;
- функція $Q(x_1, \dots, x_n)$ унімодальна, тобто має один екстремум;
- на змінні x_i не накладено жодних обмежень.

Геометричну інтерпретацію пошуку ефективної кількості перевірюваних поліномів РСЗК турбо коду покажемо на прикладі мінімізації функції двох змінних $Q = Q(x_1, x_2)$.

На рис. 10 зображено лінії рівня функції $Q (Q^r = \text{const}, Q^0 > Q^1 > Q^2 > \dots)$. Точка M відповідає мінімуму функції Q , тобто $Q^* = Q(M)$.

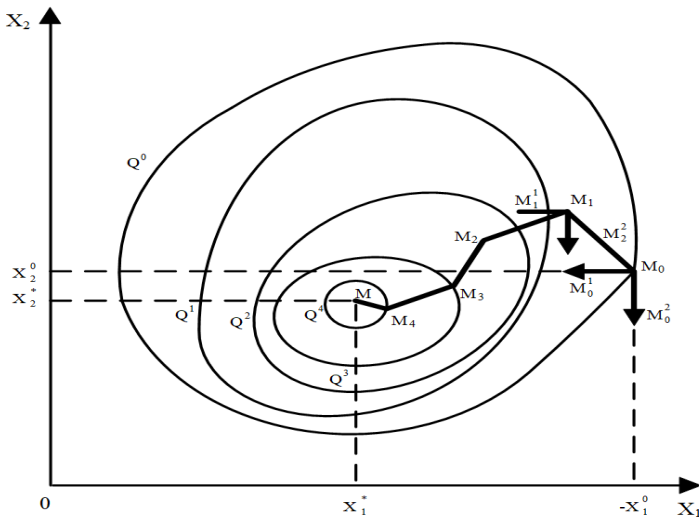


Рисунок 10. Геометрична інтерпретація пошуку ефективної кількості перевірюваних поліномів РСЗК турбо коду

Нехай спочатку задані значення параметрів x_1^0 і x_2^0 і відомо значення функції $Q^0 = Q(x_1^0, x_2^0)$ в точці M_0 .

Саме собою знання величини Q^0 у точці ще не може вказати, у якому напрямі слід рухатися задля досягнення точки M мінімуму функції Q . Тому для визначення напрямку руху проводимо серію пробних збільшень змінних. Перший пробний крок відповідає переміщенню з точки M_0 на точку M_0^1 . При цьому змінюється лише змінна x_1 і обчислюється збільшення ΔQ_1 функції Q . При досить малих значеннях воно пропорційно до часткової похідної, тобто $\partial Q / \partial x_1 \approx \Delta Q_1 / \Delta x_1$.

Аналогічно при наступному пробному збільшенні змінної x_2 визначається

$$\partial Q / \partial x_2 \approx \Delta Q_2 / \Delta x_2. \tag{3}$$

Таким чином, в результаті двох пробних прирощень змінних визначається градієнт функції Q . Робоче переміщення відбувається по лінії M_0M_1 в напрямку, протилежному напрямку градієнта функції Q . Далі відбувається визначення градієнта в точці M_1 , робочий рух в напрямку, протилежному напрямку градієнта до точки M_2 і т.д. до точки M .

Градієнт функції $Q(X)$ (позначається $gradQ$ або ∇Q) є вектор, прикладений в точці X , що має напрям нормалі η до поверхні рівня функції в даній точці у бік зростання і довжину, що дорівнює $\partial Q / \partial \eta$.

Вектор градієнта функції Q у точці $M_r(x^r_1, \dots, x^r_n)$ виражається формулою

$$gradQ^r = \sum_{i=1}^n \frac{\partial Q}{\partial x_i} j_i, \tag{4}$$

де j_i – ортогональні одиничні вектори осей координат; $\partial Q / \partial x_i$ – значення відповідних часткових похідних. Як зазначалося вище, часто при вирішенні практичних завдань оптимізації часткові похідні $\partial Q / \partial x_i$ не вдається визначити за аналітичними виразами. У цьому випадку для визначення наближеного значення градієнта

$$gradQ \approx \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Q_i}{\Delta x_i} j_i \tag{5}$$

послідовно всім змінним x_i дають малі пробні збільшення Δx^r_i і обчислюють (вимірюють) відповідні збільшення ΔQ_i до функції Q ,

$$\Delta Q^r_i = Q(x^r_1, \dots, x^r_i + \Delta x^r_i, \dots, x^r_n) - Q(x^r_1, \dots, x^r_i, \dots, x^r_n). \tag{6}$$

Зауважимо, що у окремих випадках вид функції Q повністю відомий, наприклад, ця функція задана формулою, тоді відпадає необхідність у виконанні пробних прирощень для визначення

$$\partial Q / \partial x_i.$$

На відміну від пробних прирощень змінних Δx^r_i , застосовуваних для визначення $gradQ$, прирощення Δx^p_i , яке відбувається під час переміщення у бік – $gradQ$, називатимемо робочим. Робочі збільшення визначаються за формулою

$$\Delta x^p_i = -a \frac{\partial Q}{\partial x_i}, \tag{7}$$

де a – коефіцієнт пропорційності.

Координати нової точки M_{r+1} після робочого переміщення визначаються за формулою

$$x_i^{r+1} = x_i^r + \Delta x_i^p. \quad (8)$$

Швидкість збіжності процесу пошуку мінімуму функції та його точність істотно залежить від вибору величини a у формулі (7). Для збільшення швидкості переміщення далеко від $\min Q$ величину a доцільно обирати досить великою. Однак при цьому в кожній новій точці пошуку M_{r+i} слід перевіряти умову зменшення функції

$$Q^{r+1} < Q^r \quad (9)$$

для того, щоб не перескочити за рахунок більшого кроку Δx_i^p точку $\min Q$.

Якщо умова (9) порушується, слід поступово зменшувати величину a , тобто наближати точку M_{r+1} до M_r , доки умова (9) не виконається.

Проте, слід мати на увазі, що формула (7) сама забезпечує автоматичну зміну величини робочого кроку Δx_i^p пропорційно величині складової градієнта Q . Тому іноді може бути доцільним, навпаки, далеко від $\min Q$ проводити пошук із малим значенням a , а поблизу – з великим. Для стабілізації величини робочого кроку, щоб не уповільнювати пошук в околиці $\min Q$, іноді величину коефіцієнта a роблять залежною від $\sum_{i=1}^n |\partial Q / \partial x_i|$,

наприклад, що зменшується зі збільшенням $\sum_{i=1}^n |\partial Q / \partial x_i|$.

Таким чином, стратегія пошуку методом градієнта полягає в тому, щоб поєднувати належним чином пробні кроки з вивчення поверхні функції визначення напрямку руху до $\min Q$ і робочі кроки в цьому напрямку.

Для розумного поєднання швидкості і точності та спрощення алгоритму пошуку пропонується чергувати грубий і точний пошук в залежності від того, як далеко знаходиться точка M_r від мінімуму. За міру близькості до мінімуму ε зручно прийняти суму абсолютних значень похідних $\partial Q / \partial x_i$:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n |\partial Q / \partial x_i|. \quad (10)$$

Введемо деякі позитивні константи ε_1 та ε_2 ($\varepsilon_2 > \varepsilon_1$) й умовимося, що:

– якщо $\varepsilon \geq \varepsilon_2$, то необхідний грубий пошук, тобто пошук з великим значенням коефіцієнта a у формулі (7);

– якщо $\varepsilon_1 \leq \varepsilon < \varepsilon_2$, то потрібний точний пошук;

– якщо $\varepsilon < \varepsilon_1$, то пошук закінчено.

Для побудови алгоритму пошуку важливо визначити умову закінчення процесу пошуку. В якості таких умов можуть бути прийняті наступні умови:

1. Пробні збільшення змінних x'_i у точці M_r обох знаків призводять до позитивного збільшення функції Q , тобто

$$\Delta Q_{i+\Delta x} \geq 0; \Delta Q_{i-\Delta x} \geq 0 (i = \overline{1, n}). \quad (11)$$

2. Задовольняються відповідні аналітичні необхідні та достатні умови існування мінімуму функції:

$$gradQ = 0; \frac{\partial^2 Q}{\partial x_i^2} \geq 0 (i = \overline{1, n}). \quad (12)$$

3. Наближене значення $gradQ$ за модулем не перевищує деякої завчасно заданої додатної величини ε , тобто

$$|gradQ| \leq \varepsilon. \quad (13)$$

В таблиці 1 показані значення ефективної кількості перевірочних поліномів РСЗК турбо коду, знайдені запропонованим алгоритмом, для цільової функції $J = P_{номдек} = 10^{-3}$ та різних значень розмірів вхідного блоку даних.

Таблиця 1. Значення ефективної кількості перевірочних поліномів РСЗК турбо коду, знайдені запропонованим алгоритмом

Параметри турбо коду	Розмір вхідного блоку даних, біт						
	100	500	1000	2000	4000	8000	16000
G1	17	17	13	9	9	13	9
G2	19	19	11	13	11	-	-
G3	23	-	15	11		-	-

Таким чином, отримана ефективна кількість перевірочних поліномів РСЗК турбо коду для забезпечення заданої цільової функції (ймовірності бітової помилки декодування), що дозволить зменшити кількість помилок, тим самим підвищить ефективність функціонування безпроводових систем передачі інформації.

Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Стаття присвячена підвищенню ефективності функціонування безпроводових систем передачі інформації за рахунок адаптації кількості перевірочних поліномів РСЗК турбо коду на основі пошуку екстремума функції.

2. Як результат роботи запропонованого методу наведено ефективну кількість перевірочних поліномів РСЗК турбо коду, які були знайдені із застосуванням методу для каналу з адитивним білим гаусівським шумом для різних розмірів вхідного блоку даних.

3. Напрямком подальших досліджень вважаємо розширити діапазон пошуку для врахування більшої кількості параметрів турбо кодів при адаптації, при цьому можна передбачити наступні: кількість біт в блоці, типи перемежувачів, алгоритми декодування, ітерації декодування і т.д.

REFERENCES

1. Wan, L., Anthony C.K., Soong, Jianghua, L., Yong, W., Classon, B., Xiao, W., Mazzaresse, D., Zhao, Yang, & Saboorian, T. (2021). 5G System Design: An End to End Perspective. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22236-9>
2. Neir, P. (2021). Securing 5G and Evolving Architectures. Addison-Wesley Professional. <https://www.amazon.com/Securing-Evolving-Architectures-Pranod-Nair/dp/0137457936>
3. Hassan, S., Orel, A., & Islam, K. (2022). A Network Architects Guide to 5G. Addison-Wesley Professional. <https://www.amazon.com/Network-Architects-Guide-5g/dp/0137376847>
4. Jin, J., Xiao, C., Chen, W., Member, S. and Wu, Y. (2019). Channel-Statistics Based Hybrid Precoding for Millimeter-Wave MIMO Systems With Dynamic Subarrays. *IEEE Trans. Commun.*, 67, 3991-4003. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2899628>
5. Huang, H. (2020). Deep learning for physical-layer 5G wireless techniques: Opportunities, challenges and solutions. *IEEE Wirel. Commun.*, 27, 214–222. <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1900027>
6. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27 (3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
7. Azougaghe, E., Farchane, A., Said, S., & Belkasmi, M. (2022). Turbo decoding of concatenated codes based on RS codes using adapted scaling factors. *Infocommunications Journal*, 14 (1), 11-16. <https://doi.org/10.36244/ICJ.2022.1.2>
8. Kovaci, M., Balta, H., Baynast, A., & Nafornita, M. (2007). Performance Comparison of Punctured Turbo Codes and Multi Binary Turbo Codes. In *2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (IEEE Xplore)*. <https://doi.org/10.1109/ISSCS.2007.4292768>
9. Vaz, A., Nayak, G., Nayak, D., & Hegde, N. (2022). Decoding of Turbo Code and Polar Code using Deep Learning for Visible Light Communication. *Journal of Engineering Science and Technology*, 17 (4), 2776-2787. https://jestec.taylors.edu.my/Vol%2017%20Issue%204%20August%202022/17_4_36.pdf
10. Berrou, C., Glavieux, A., & Thitimajshima, P. (1993). Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo-codes. In *Proc. Int. Conf. On Commun., ICC-93, Geneva, 1993, May*, (pp. 1064-1070). <https://doi.org/10.1109/ICC.1993.397441>
11. Xiang-Gen, X. (2024). Understanding turbo codes: A signal processing study. *Journal of Information and Intelligence*, 2, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2023.10.003>
12. Takeuchi, K., Muller, RR., & Vehkaperä, M. (2011). A Construction of Turbo-Like Codes for Iterative Channel Estimation Based on Probabilistic Bias. In *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011*, (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2011.6133738>
13. Jin, X., Eckford, AW, & Fuja, TE. (2004). Analysis of Joint Channel Estimation and LDPC Decoding on Block Fading Channels. In *International Symposium on Information Theory and its Applications, ISITA2004*, (pp. 679-684). <https://doi.org/10.1109/ISIT.2004.1365412>
14. Berrou, C. (2010). Codes and Turbo Codes. Springer. <https://www.scribd.com/document/511006154/Codes-and-Turbo-Codes-C-Berrou-Springer-2010-BBS>
15. Vucetic, B., & Yuan, J. (2000). Turbo Codes. Principles and Applications. Springer Science. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4469-2>

Стаття надійшла до редакції 14.03.2024 і прийнята до друку після рецензування 06.06.2024

The article was received 14.03.2024 and was accepted after revision 06.06.2024

Курбет Павло Миколайович

аспірант Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0612-3859> **e-mail:** tovsba@gmail.com

Руденок Олександр Анатолійович

аспірант Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-6910-1823> **e-mail:** a_rudenok@ukr.net

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copying © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. All rights reserved.

ДО УВАГИ АВТОРІВ ЗБІРНИКА

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню збірника.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова (не менше п'яти) двома мовами (українською та англійською).

Підготовка статті здійснюється в текстовому редакторі MS WORD for WINDOWS, з використанням шрифту Times New Roman, Суг, кегль 11, одинарний інтервал, полями 2,0 см з кожного боку, заданим розміром сторінок 17x26 см.

Усі формули мають бути набрані в редакторі MathType.

Ілюстрації повинні обов'язково нумеруватися, мати книжкову орієнтацію і не можуть перевищувати за розміром задану сторінку (параметри сторінки 17x26 см з полями 2,0 см). Перелік літературних джерел перекладається англійською мовою (або транслітерується в романському алфавіті) і подається відповідно до міжнародного стандарту оформлення наукових публікацій **APA (American Psychological Association) style** загальним списком у кінці статті за чергою посилань у тексті.

Наприкінці статті наводиться коротка довідка про авторів, де вказуються прізвище, повне ім'я та по батькові авторів, науковий ступінь, вчене звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, особисті дані кожного з авторів (адреса, місто, країна, контактний телефон, e-mail), ORCID ID.

Обов'язково слід надати електронну версію статті в редакторі Microsoft Word.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами збірника, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ збірника, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником. Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія збірника.

Електронна версія збірника, правила оформлення та вимоги до статей містяться в Інтернеті на сайті <http://www.es-journal.in.ua>, який систематично оновлюється.

Збірник наукових праць також представлений на сайті Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України <http://itgip.org/> у розділі «Видавнича діяльність» та на сайті бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури <http://library.knuba.edu.ua/node/883>.

Редактор – В.П. Берчун

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36а.
Тел.: (044) 360-22-66
www.yuston.com.ua

**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
серія дк № 497 від 09.09.2015 р.**

Підписано і здано до друку 28.06.24 Формат 70x108/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 14.8
Обл.-вид. арк. 11.25
Замовлення № _____

Тираж 300 примірників

КИЇВ 2024