

**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 (46), квітень – червень 2023 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 2 (46), April – June 2023

Founded in 2008
The journal is published 4 times a year

КИЇВ 2023

KYIV 2023

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.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.

Н.В. КАСАТКІНА, д-р техн. наук

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

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

Д. МІНТЕР, проф., Великобританія

А. МШЮ, дослідник, Франція

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

Я. ПЕКУТІН, проф., Польща

ПІНГ ЛУ, проф., Китай

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури (протокол № 9 від 26.06.2023)

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)

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

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

Електронна версія збірника в Інтернеті
<http://www.es-journal.in.ua> українською
та англійською мовами



Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Петроченко О.В. Проблема паводків та аналіз шляхів її рішення.....	5
Ujma A. Prospects for creating surfaces with vegetation on buildings in Poland	23
Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О., Кравченко М.В. Вплив «зелених» покрівель на управління дощовими водами: огляд наукових досліджень та перспективи використання.....	35
Кирієнко П.Г., Бетін О.В., Захарченко М.І., Лобов С.О., Мсаллам К. Дослідження технологій вилучення важких металів із промислових стічних вод.....	54
Рудаков Л.М. Екологічна та експлуатаційна безпека хвостосховищ: аналіз аварій, причин та методів діагностики технічного стану.....	66

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Цопа В.А., Чеберячко С.І., Яворська О.О., Негрій Т.О., Ткаченко Т.М., Дерюгін О.В. Особливості оцінки професійних ризиків при вантажних автомобільних перевезеннях.....	85
Ченчева О.О. Аналіз фракційного складу пилу робочої зони при свердлуванні композиційних матеріалів на основі карбонових волокон	100

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Нестеренко О.В., Поліщук В.Б., Хижняк В.В., Шевченко В.Л. Інформаційні технології підтримки прийняття рішень щодо визначення ресурсів для гасіння лісової пожежі засобами авіації.....	109
Рогожин О.Г., Яковлев Є.О., Крета Д.Л. Оновлена електронна карта прояву та розвитку підтоплення за причинами в Україні.....	124
Stefanyshyn D. Testing a numerically-analytical method for prediction design maxima discharges of floods using plotting position formulas: the river Uzh case, the “Uzhhorod” gauging station data.....	138
Сорокін М.В. Розпаралелювання чисельних розв’язків рівнянь мілкої води методом скінченних об’ємів для реалізації на багатопроекторних системах і графічних процесорах.....	163
Kipiani G., Kristesiashvili E., Tabatadze A., Jangidze Z. Study of Non-Linear Oscillations of the High-Rise Buildings.....	194
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	203

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Petrochenko O. The problem of flooding and analysis of the ways of its solution.....	5
Ujma A. Prospects for creating surfaces with vegetation on buildings in Poland	23
Tkachenko T., Mileikovskiy V., Kravchenko M. Impact of "green" roofs on rainwater management: review of scientific research and perspectives of use	35
Kyriienko P., Betin O., Zakharchenko M., Lobov S., Msallam K. Research of technologies for the extraction of heavy metals from industrial wastewater.....	54
Rudakov L. Environmental and operational safety of tailing storage facilities: analysis of accidents, causes and technical state diagnostic methods	66

CIVIL SAFETY

Tsopa V., Cheberiachko S., Yavorska O., Nehrii T., Tkachenko T., Deryugin O. Features of the assessment of occupational risks in truck transportation.....	85
Chencheva O. Analysis of the fractional composition of the dust of the working area when drilling composite materials based on carbon fibers.....	100

INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

Nesterenko O., Polischuk V., Khyzhniak V., Shevchenko V. Decision-making information technologies for the resources determination of forest fire extinguishing by aviation.....	109
Rogozhin O., Yakovlev E., Kreta D. The updated electronic map of the overwetting manifestation and development by causes in Ukraine.....	124
Stefanyshyn D. Testing a numerically-analytical method for prediction design maxima discharges of floods using plotting position formulas: the river Uzh case, the "Uzhhorod" gauging station data.....	138
Sorokin M. Parallelization of numerical solutions of shallow water equations by the finite volume method for implementation on multiprocessor systems and graphics processors.....	163
Kipiani G., Kristesiashvili E., Tabatadze A., Jangidze Z. Study of Non-Linear Oscillations of the High-Rise Buildings.....	194
INFORMATION FOR AUTHORS	203

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

УДК 627.51 : 001.8

Oleksiy Petrochenko, PhD, Director of the Institute of Innovative Education
ORCID ID: 0000-0003-2184-4811 *e-mail*: a_petr89@ukr.net

Institute of Innovative Education of Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

THE PROBLEM OF FLOODING AND ANALYSIS OF THE WAYS OF ITS SOLUTION

***Abstract.** An analysis of literary sources and informational materials on flood situations that occurred in different historical periods on different continents and in different countries was carried out. It has been established that floods accompany mankind from the earliest times to the present day. Information about catastrophic floods has been preserved since the third millennium BC, in connection with which they should be considered as a historical category. According to the World Meteorological Organization (WMO), floods account for more than 45% of natural disasters related to water (hydrological disasters), which account for about 70% of all natural disasters on the planet. Taking into account the fact that floods are among the most dangerous natural phenomena in terms of the number of victims and the amount of damage, the problem of floods should be considered global. The global nature of the flood problem is confirmed by its following features: the problem concerns all humanity, affects the interests and fate of all countries and peoples; leads to significant social, ecological and economic losses, which, if they increase, will threaten the existence of human civilization; contributes to the aggravation of other internationally recognized global problems, such as environmental, food, social (in terms of population protection), land degradation. Taking into account the fact that in recent years the incidence of catastrophic floods has increased, their social, ecological and economic consequences have increased, as well as the number of human victims from floods, the article focuses on the need to develop a highly effective scientific and methodological toolkit for solving the problem of floods and its wide use not only in Ukraine, but also in many countries of the world. It has been established that among the many areas of systemic research of the problem of floods, the main and most important area is the fundamental improvement of the conceptual foundations of flood protection. The author's version of the universal concept of solving the flood problem is proposed, which is based on a universal algorithm for achieving the target indicator of flood protection. The maximum value of the ratio of the flood protection effect to the costs of achieving this effect was chosen as the target indicator of flood protection. The protective anti-flood effect is represented by the total damage averted by anti-flood measures, which consists of averted social, ecological and economic damages.*

***Key words:** flood; the problem of floods; consequences and damages from floods; anti-flood measures; systematic analysis of flood protection measures; flood protection concept; target indicator of flood protection; averted damages.*

О.В. Петrenchенко

Інститут інноваційної освіти Київського національного університету будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ПРОБЛЕМА ПАВОДКІВ ТА АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ЇЇ РІШЕННЯ

***Анотація.** Проведено аналіз літературних джерел та інформаційних матеріалів щодо паводкових ситуацій, які відбувались в різні історичні періоди на різних континентах і в різних країнах. Відмічено, що паводки супроводжують людство з найдавніших часів і до наших днів. Відомості про катастрофічні паводки збереглися з третього тисячоліття до нашої ери, у зв'язку з чим їх слід розглядати як історичну категорію. За даними Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО), на паводки припадає понад 45% стихійних лих, що пов'язані з водою (гідрологічні лиха), які становлять близько 70% усіх стихійних лих на планеті. Зваживши на те, що паводки за кількістю жертв і розміром збитків належать до одних із найнебезпечніших природних явищ, проблему паводків слід вважати глобальною. Глобальний характер проблеми паводків підтверджується такими її ознаками: проблема стосується усього людства, зачіпає інтереси і долю всіх країн та народів; призводить до значних соціальних, екологічних та економічних збитків, які у разі їх збільшення загрожуватимуть існуванню людської цивілізації; сприяє загостренню інших міжнародно визнаних глобальних проблем, таких як екологічна, продовольча, соціальна (в частині захисту населення), деградація земель. Враховуючи те, що за останні роки почастишали випадки катастрофічних паводків, зросли їх соціальні, екологічні та економічні наслідки, а також кількість людських жертв від паводків, в статті акцентовано увагу щодо необхідності розробки високоефективного науково-методичного інструментарію рішення проблеми паводків та його широкого використання не лише в Україні, а й у багатьох країнах світу. Розглядаючи проблему паводків як глобальну багатоаспектну проблему, вказується про необхідність застосування системного підходу до її рішення. Систематизовано результати попередніх досліджень, проведених в Україні та за кордоном, а також директивних і законодавчих документів, що стосуються проблеми паводків. Встановлено, що серед багатьох напрямів напрямом є фундаментальне вдосконалення концептуальних засад протипаводкового захисту. Запропоновано авторський варіант універсальної концепції рішення протипаводкової проблеми, яка базується на універсальному алгоритмі досягнення цільового показника протипаводкового захисту. Цільовим показником протипаводкового захисту обрано максимальне значення відношення протипаводкового ефекту до витрат на досягнення цього ефекту. Захисний протипаводковий ефект представлений відвертеним протипаводковими заходами загальним збитком, який складається із відвернутих соціального, екологічного та економічного збитків.*

***Ключові слова:** паводок; проблема паводків; наслідки та збитки від паводків; протипаводкові заходи; системний аналіз заходів захисту від паводків; концепція захисту від паводків; цільовий показник протипаводкового захисту; відвернуті збитки.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.5-22>

Вступ

Від паводків людство потерпає протягом усього періоду свого існування. З найдавніших часів люди змушені були захищати від паводків власне життя та майно. Незважаючи на сучасний технічний прогрес, який сприяв впровадженню в багатьох країнах світу більш досконалих інженерних протипаводкових споруд, кількість людських жертв та розмір збитків від паводків з кожним роком зростають з неймовірною швидкістю. У другій половині минулого століття збитки від паводків на земній кулі зросли приблизно у 10 разів. В окремі роки збитки від паводків перевищують 200 млрд доларів США і супроводжуються загибеллю тисяч людей. Площа періодично затоплених паводками територій земної кулі становить приблизно 3 млн км², що відповідає сумарній площі всіх держав Західної Європи та в 5 разів перевищує площу України. У паводконебезпечних районах земної кулі зараз проживає приблизно 1 млрд осіб [1].

Проблемі паводків в Україні та за її межами присвячено велику кількість публікацій, які за їх характером можна поділити на наукові та інформаційні. Кількість публікацій інформаційного характеру у вигляді різних оповідей та повідомлень про паводкові ситуації на планеті значно перевищує кількість наукових публікацій, при цьому наукові публікації містять результати досліджень окремих аспектів проблеми паводків (генезис паводків, наслідки та збитки від паводків, районування паводконебезпечних територій тощо). Проте до цього часу науковцями ще не створено цілісної концепції протипаводкового захисту. На цей час розроблено багато заходів та засобів захисту від паводків: берегоукріплення, спорудження захисних дамб, спорудження протипаводкових водосховищ, регулювання русел річок тощо, застосування яких деякі автори намагаються подати як концепції захисту [2, 3]. Однак такі пропозиції можна розглядати тільки як окремі варіанти протипаводкового захисту. Враховуючи те, що найбільш важливою складовою науково-практичного рішення проблеми паводків є концепція захисту, постає актуальна потреба створення універсальної науково детермінованої концепції, використання якої забезпечувало б досягнення гарантованого захисного ефекту при мінімальних розмірах інвестиційних вкладень в протипаводковий захист.

Мета дослідження – виконати системний аналіз основних напрямів дослідження паводків та розробити принципові положення універсальної концепції протипаводкового захисту.

З огляду на те, що проблема паводків є глобальною та багатоаспектною, вона потребує системного підходу до її рішення. В роботі з позицій системного аналізу вирішувались такі основні задачі: обґрунтування актуальності створення універсальної концепції захисту від паводків (розділи 1–2); систематизація основних напрямів дослідження та рішення проблеми паводків (розділ 3); обґрунтування універсальної концепції протипаводкового захисту (розділ 4).

Виклад основного матеріалу досліджень

1. Паводки як історична категорія. Паводки належать до найнебезпечніших стихійних явищ на Землі. Вони супроводжують людське суспільство з найдавніших часів і до наших днів [4]. В усьому світі поширено легенди про великий потоп. Багато дослідників вважають, що велика кількість переказів про потопи ґрунтуються на дійсних фактах катастрофічних затоплень значних територій планети у давно минулі роки. За результатами досліджень істориків, археологів, біологів та етнографів було встановлено, що на межі четвертого та третього тисячоліття до нашої ери у Месопотамії відбулися грандіозні паводки, які призвели до загибелі майже всіх жителів долини Тигра і Євфрату. Затоплена паводками територія долини між горами і пустелею на той час представлялась місцевим жителям цілим світом. Тому катастрофічні паводки в Месопотамії, в яких загинула більша частина жителів долини Тигра і Євфрату, у небагатьох, що залишились живими, сприймались, як всесвітній потоп. Припускається, що один з цих паводків, про який йдеться в шумерській легенді, став підставою для розповіді про всесвітній потоп у Старому Заповіті [5].

Зараз науковцями виконано велику роботу з вивчення оповідей про великий потоп у різних країнах, з переліку яких можна судити про те, що спричинені паводками великі потопи відбувалися практично у всіх районах земної кулі. Отже, про великий потоп зараз сформовано перелік вавилонських, єврейських, давньогрецьких, давньоіндійських сказань. В цей перелік входять також сказання про великий потоп у Східній Азії, на островах Малайського архіпелагу, в Австралії, в Новій Гвінеї та Меланезії, в Полінезії та Мікронезії, у Південній Америці, у Центральній Америці та Мексиці, у Північній Америці, в Африці [6, 7].

Проблема паводків торкнулася майже кожної країни світу, але серед багатьох раніше зафіксованих на планеті паводків найбільш руйнівними були паводки в Китаї [8–10]. За наслідками ці паводки можна порівняти з найбільш кровопролитними війнами. До наших днів дійшли відомості про катастрофічні розливи р. Хуанхе в 2297 році до нашої ери. Однією з найбільших гідрологічних катастроф на Землі вважається паводок 1332 року на р. Хуанхе, внаслідок якого загинуло 7 млн чоловік [8]. Не менш великий паводок в басейні річки Хуанхе стався восени 1887 року, коли було затоплено 11 міст і 300 сіл. За офіційними даними загинуло 900 тис. чоловік, а за неофіційними – від 2 до 6 млн чоловік [8, 10].

В серпні 1931 року, в результаті сильних затяжних дощів найдовша і повноводна річка Китаю Янцзи і сусідня з нею річка Хуанхе одночасно вийшли з берегів і затопили понад 300 тисяч гектарів родючих земель, повністю знищивши на цій площі сільське господарство. Паводок забрав 3,7 мільйони людських життів, 40 мільйонів чоловік постраждали від голоду, розрухи, хвороб [8, 9, 11].

З 12 червня по 30 серпня 1998 р. в Китаї сталося 13 паводків, які торкнулися майже всієї території країни. Від них постраждало 240 млн чоловік, тобто в 6 разів більше, ніж зараз проживає в Україні. Понад 56 млн осіб довелося тимчасово евакуювати. Загинуло тисячі людей [9, 12].

Частота паводків з роками має тенденцію до збільшення. Паводки на р. Хуанхе в період з XXI по XVI ст. до н.е. відбувалися приблизно кожні

50 років. З 206 р. до н.е. по 25 р. н.е., в період правління династії Хен, їх було відмічено 12 з інтервалом в 20 років. З 618 р. по 907 р., в період правління династії Тан, відбувся 31 паводок з інтервалом в 9 років. У період династії Кінг, з 1644 р. по 1911 р. відбулось 480 паводків з інтервалом в 0,55 року [8].

Серед інших країн світу від паводків найбільш страждає Бангладеш. Рівнинні території, затоплювані річками Ганг, Брахмапутра, Мегхна, становлять приблизно 80% усієї площі Бангладеш. Паводки в Бангладеш стали регулярним явищем. Саме тоді життя країни повністю паралізується. Людям доводиться рятуватися на пагорбах, високих насипах, дахах будинків і навіть на деревах. Тринадцять тропічних циклонів обрушилися на узбережжя цієї країни у період із 1960 по 1970 рр. З 1950 по 1988 р. на території Бангладеш сталось 25 найсильніших паводків. У 1970 р. від паводку загинуло 300 тис. людей. Увагу всього світу прикули до себе паводки 1987 та 1988 років. За офіційними оцінками в 1988 р. із загальної площі території країни, що дорівнює 144.8 тис. км², було затоплено понад половину – 82 тис. км² [13].

Оскільки історію багатьох країн світу від біблейських часів до наших днів можна без перебільшення назвати історією боротьби з паводками, паводки доцільно сприймати як історичну категорію планетарного масштабу.

2. Паводки як глобальна проблема. За кількістю жертв і розміру збитків паводки займають одне з перших місць у ряді стихійних лих і катастроф. Останніми роками з ростом населення планети, урбанізації територій, зведення лісів, розвитком господарської діяльності людини, а також в умовах змін клімату почастишали катастрофічні паводки, посилювалися їх економічні, соціальні та екологічні наслідки та зросла кількість викликаних ними людських жертв [14, 15]. Ще більш швидко зростають руйнівні наслідки паводків та збитки від них. Так, у найбільш паводкобезпечному Карпатському регіоні України середньорічні збитки від паводків у 1995–1998 роках становили більше 900 млн гривень, у 1999–2007 роках – понад 1,5 млрд гривень, у 2008–2010 роках – близько 6 млрд гривень. Загальні збитки від паводку, що відбувся в 20-х числах червня 2020 року внаслідок проходження інтенсивних грозових дощів та значного підвищення водності в річках Дністер, Прут, Черемош, Бистриця, оцінили на суму 3–4 млрд грн [16].

За даними Всесвітньої метеорологічної організації (WMO) приблизно 50% стихійних лих, пов'язаних з водою (гідрологічні лиха), спричинені підвищенням рівня поверхневої та ґрунтової води (рис. 1). З загальної кількості стихійних лих, що сталися наприкінці 20-го і початку 21-го століття, понад 60% припадає на долю тих, що пов'язані з гідрометеорологічними явищами та процесами [17]. На долю паводків припадає 45% загальної кількості стихійних лих на планеті (рис. 2).

З огляду на значну долю паводків в складі інших стихійних лих на планеті (рис. 1, 2), а також враховуючи надзвичайно небезпечний характер паводків, що мали місце в різних країнах світу (табл. 1), у тому числі в Україні (табл. 2), проблему паводків слід вважати глобальною.

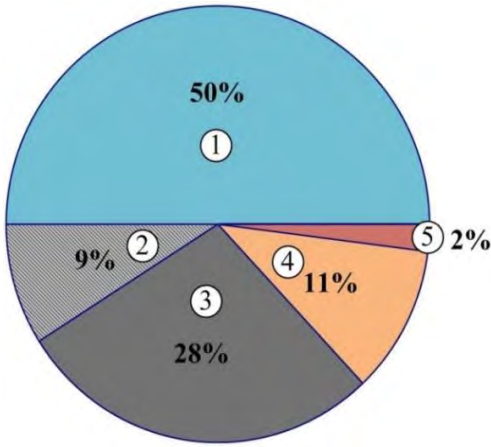


Рис. 1. Типи стихійних лих, пов'язаних з водою:

1 – висока поверхнева та ґрунтова вода (руйнівна дія води, затоплення, підтоплення); 2 – зсуви, селі; 3 – епідемії, викликані водою; 4 – посуха; 5 – голод

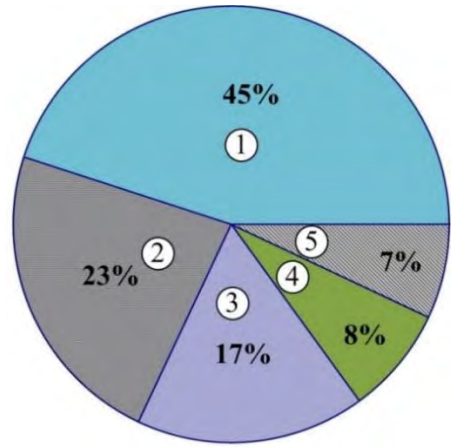


Рис. 2. Розподіл природних надзвичайних ситуацій з числом жертв понад 100 чоловік, або економічним збитком понад 1 млрд дол. США:

1 – паводки; 2 – буревії, смерчі; 3 – землетруси, вулкани, цунамі; 4 – тропічні циклони; 5 – зсуви

Таблиця 1. Найбільші паводки, що відбулись в різних країнах світу

Дата	Континент, країна, регіон та наслідки проходження паводку
Липень 1342 р.	Німеччина. Паводок на річках Рейн, Мозель, Майн, Дунай, Везер, Верра, Унструт, Ельба. Пошкоджено міста Кельн, Майнц, Франкфурт-на-Майні, Вюрцбург, Регенсбург, Пассау та Відень. В період паводку загинуло понад 6 тис. осіб, в наступні роки від спричинених паводком голоду та пандемії чуми загинуло більш третини населення Центральної Європи
5 листопада 1530 р.	Нідерланди. Повінь Святого Фелікса. Загибло понад 100 тис. осіб
Липень 1911 р.	Китай. Р. Янцзи. Загибло 100 тис. чол. Без житла залишилось 5 млн осіб
Серпень 1931 р.	Китай. Р. Янцзи та р. Хуанхе. Загибло 3,7 мільйони чол. Постраждало 40 млн чол. Затоплено 300 тис. га земель
14 серпня 1955 р.	Китай, провінція Аньхой. Повінь в басейні р. Хуанхе. Загибло 500 чол. Позбавилося даху 10 млн осіб. 5 млн акрів земель затоплено.
4 жовтня 1955 р.	Пакистан і Індія. Повінь в басейні річок Інд і Ганг. Загибло 1700 чол. Збиток становив 63 млн дол. США від затоплення 5,6 млн акрів земель
12 листопада 1970 р.	Бангладеш. Повінь в дельті Гангу. Затоплено понад 50% території країни. Загибло понад 300 тис. осіб. Втрачено врожаю на 63 млн дол. США
Липень-серпень 2010 р.	Пакистан. Дощовий паводок. Затоплено п'яту частину країни. Кількість постраждалих перевищила 21 млн чол. Загибло 1600 осіб; збиток становив понад 10,0 млрд дол. США

Дата	Континент, країна, регіон та наслідки проходження паводку
Грудень 2010 р. – січень 2011 р.	Австралія. Паводок в штаті Квінсленд. В зоні затоплення опинилось 22 міста та понад 200 тис. людей. Загинуло 25 чол. Зруйновано 30 тис. будинків. Збиток становив 24 млрд дол. США
2-13 червня 2013 р.	Країни Центральної Європи. Паводок на річках Дунай, Рейн, Майн. Загинуло 24 людини. Збиток становив 15 млрд дол. США
4 жовтня 2009 р.	Індія. Повінь в штатах Карнатака та Андхра-Прадеш. Загинуло понад 300 осіб, постраждало близько 2 млн осіб. Збиток становив 1,0 млрд дол. США
16-20 червня 2010 р.	Катастрофічний паводок у Польщі. Загинуло 24 людини. Затоплено 2157 населених пунктів. Збиток становив 2,5 млрд євро
12-30 липня 2021 р.	Серія дощових паводків в країнах Європи, викликаних циклоном Бернд (Bernd). Вода у декількох річкових басейнах вийшла з берегів. Основний збиток від гідрологічного лиха, визнаного найбільшим за останні 100 років, припав на Німеччину. Загинуло та пропало безвісти понад 243 особи

Таблиця 2. Найбільші паводки на території України

Дата	Річки України, регіони та наслідки проходження паводку
8-9 липня 1911 р.	Р. Прут, р. Серет. Витрата води в р. Серет досягла 1000 м ³ /с
1-2 вересня 1941 р.	Басейн річок Дністра, Пруту і Серету. Зливові опади призвели до небувалого паводку ймовірністю 1/250 років. Максимальні рівні води в Дністрі на 1-3 м перевищили найвищі рівні води у попередні роки
4-8 листопада 1998 р.	Річки Закарпаття. Затоплено 119 населених пунктів, зруйновано 3248 будинків та 22 мости, пошкоджено близько 100 тис. га сільгоспугідь. Виникло 600 зсувів та 98 селевих потоків. Збиток становив 810 млн грн
Липень 1999 р.	С. Долішній Шепіт на р. Серет. Зруйновано 8 мостів, гребля та 10 км автодороги. Загинуло 4 чол. Збиток становив понад 1,3 млн грн
3-5 березня 2001 р.	Річки Закарпаття. Загинуло 9 осіб. Затоплено 251 поселення
28-29 липня 2001 р.	Басейн Дністра. Затоплено 33 поселення, зруйновано 17 мостів. Загинуло 2 людей. Збиток становив понад 20 млн грн
23-27 липня 2008 р.	Річки Прикарпаття. Затоплено 615 населених пунктів та більше 34 тис. га сільгоспугідь. Загинуло 42 чол. Збиток становив 3–4 млрд грн
15-20 травня 2010 р.	Дощовий паводок на річках Закарпатської, Івано-Франківської, Львівської, Чернівецької та Тернопільської областей. Затоплено близько 4 тис. га сільгоспугідь. Збитки від стихії у регіоні склали понад 75,5 млн грн
23-27 червня 2020 р.	Паводок на річках Дністер, Прут, Черемош, Бистриця. Пік паводку визнано найбільшим за останні 60 років. Збиток становив 3–4 млрд грн

Глобальний характер проблеми паводків підтверджується такими її ознаками: стосується усього людства; зачіпає інтереси і долю багатьох країн; призводить до значних соціальних, екологічних та економічних збитків, які у разі їх збільшення будуть загрожувати існуванню людської цивілізації.

Характерною ознакою проблеми паводків є те, що вона входить до складу багатьох інших проблем, які на міжнародному рівні визнані як глобальні, а саме таких проблем, як екологічна, продовольча, соціальна (загроза життю та здоров'ю населення), економічна (втрати та збитки в різних сферах життєдіяльності людства на планеті), деградація земель.

3. Систематизація основних напрямів дослідження та рішення проблеми паводків. За результатами аналізу літературних джерел, а також відповідних директивних і законодавчих документів, було визначено такі основні напрями дослідження та рішення проблеми паводків.

Аналіз та корегування визначень термінів «паводок» і «повінь». Загальновідомо, що успішне рішення будь-якої проблеми потребує детермінації її основних елементів та понять. Для поліпшення результативності системних досліджень гідрологічних явищ, пов'язаних з підйомом води у водотоках, в роботі [18] наведено результати корегування визначень термінів «паводок» і «повінь». Термін «паводок» під час проведення досліджень запропоновано використовувати як універсальний. Під паводком слід розуміти стихійний динамічний процес формування водного режиму водотоку, що відбувається в три стадії. При цьому однією такою стадією, а саме кульмінаційною стадією цього процесу, є повінь. Під повінню розуміється стадія паводку, що відбувається в момент досягнення максимальних рівнів води у водотоці та прилеглих територіях. Тому під час проведення досліджень можна окремо використовувати як термін «паводок», так і термін «повінь». Проте не припускається використовувати словосполучення «паводки і повені», оскільки нелогічно ставити на один рівень ціле і частину цього цілого, у даному випадку «процеси і стадії цих процесів».

Збір та аналіз статистичних даних проходження паводків в країнах світу та Україні. За цим напрямом опубліковано найбільшу кількість робіт, зокрема [2–14].

Класифікація паводків за їх генезисом [3, 15, 19, 20].

Районування територій за ступенем паводкової небезпеки [20–22].

Розробка концепції захисту від паводків [2, 3, 10, 23].

Розробка методів короткострокового прогнозування паводків [24].

Розробка науково-методичних засад розрахунку втрат і збитків від паводків та визначення ефективності здійснення протипаводкових заходів [25–27].

Підготовка та прийняття директиви Європейського Союзу та постанов уряду України про оцінку та управління паводковими ризиками [28–32].

Очевидно, що серед вищезазначених напрямів дослідження та рішення проблеми паводків тільки один напрям є основним та радикальним, щодо рішення проблеми паводків. Це напрям розробки концепції захисту від паводків. Серед інших напрямів деякі мають суто інформативно-пізнавальний характер, а деякі можуть бути використані як допоміжні під час рішення проблеми паводків.

4. Обґрунтування універсальної концепції захисту від паводків.

Враховуючи як актуальну необхідність рішення глобальної проблеми паводків, так і високу вартість заходів протипаводкового захисту, в основу універсальної концепції захисту від паводків закладається показник ефективності захисту у вигляді співвідношення показника позитивного ефекту здійснення заходів протипаводкового захисту і показника негативного ефекту, основну частину якого складають витрати, необхідні для здійснення заходів протипаводкового захисту.

Позитивний ефект здійснення i -го варіанта захисних заходів в зоні s паводкових ризиків, або зоні потенційного затоплення, оцінюють величиною загального відвернутого збитку BZ_s^i (збитку, відвернутого протипаводковими заходами). Загальний відвернутий збиток BZ_s^i складається з відвернутого соціального збитку $(BZ_s^{cy})^i$, відвернутого екологічного збитку $(BZ_s^{екл})^i$ та відвернутого економічного збитку $(BZ_s^{екн})^i$:

$$BZ_s^i = (BZ_s^{cy})^i + (BZ_s^{екл})^i + (BZ_s^{екн})^i. \quad (1)$$

Величина позитивного протипаводкового ефекту (відвернутого збитку BZ_s^i) і абсолютна величина негативного ефекту (наслідку) проходження паводку (збитку Z_s) знаходяться у співвідношенні:

$$BZ_s^i \leq |Z_s|. \quad (2)$$

З урахуванням співвідношення (2) показник ефективності i -го варіанта захисту від паводків зони паводкових ризиків s визначають за формулою:

$$R_s^i = \frac{BZ_s^i}{b_s^i + (Z_s - BZ_s^i)}, \quad (3)$$

де b_s^i – витрати на досягнення позитивного ефекту BZ_s^i , тис. грн/рік; $(Z_s - BZ_s^i)$ – частина збитку Z_s , яка залишилась не відвернутою протипаводковими заходами, тис. грн/рік.

За цільовий показник протипаводкового захисту R_s^{max} приймається показник найвищої ефективності вкладення інвестицій в здійснення захисних заходів. Показник R_s^{max} відповідає показнику ефективності R_s^i i -го варіанта протипаводкового захисту зони s , який знаходять серед множини u потенційно можливих варіантів захисту відповідно до цільової функції (4):

$$R_s^{max} \leftrightarrow R_s^i = \frac{BZ_s^i}{b_s^i + (Z_s - BZ_s^i)} \rightarrow \max, \quad i = 1, \dots, u. \quad (4)$$

Універсальна концепція захисту від паводків розроблюється з урахуванням таких вихідних умов:

- концепція призначена для розробки та обґрунтування заходів та засобів захисту від паводків різної забезпеченості в зонах потенційного затоплення, в яких можуть знаходитись люди, а також різні природні та штучні об'єкти, пов'язані з різними сферами життєдіяльності людей;

- враховується та підлягає аналізу не один концептуальний напрямок протипаводкового захисту, а кілька можливих альтернативних напрямків, залежно від комплексу факторів негативного впливу паводків на соціальний, екологічний та економічний стан територій зон паводкових ризиків;

- враховується та підлягає аналізу повна множина протипаводкових заходів, їх функціональних і технологічних альтернатив;

- враховується та підлягає аналізу повна множина конструктивних варіантів протипаводкових споруд, а також множина можливих технологій і засобів механізації будівництва цих споруд;

- для визначення комплексу оптимальних або найбільш прийнятних заходів та засобів захисту від паводків застосовуються науково-обґрунтовані методи, методики та рекомендації.

Відповідно до вихідних умов розробки універсальної концепції захисту від паводків, встановлено два альтернативних концептуальних напрямки протипаводкового захисту:

- напрямок ситуаційного протипаводкового захисту;

- напрямок превентивного протипаводкового захисту.

Характерні особливості захисних заходів за цими напрямками, а також перелік та порядок виконання захисних заходів наведено в роботі [23].

Обґрунтування альтернативних концептуальних напрямків та вибору варіантів заходів захисту від паводків в s -й зоні потенційного затоплення S -го басейну паводконебезпечної річки здійснюють поетапно відповідно до схеми на рис. 3.

Стадія довгострокового прогнозування.

Етап 1. Прогнозування паводкової небезпеки в зоні s за гідрологічними показниками. Методичні засади прогнозування наведено в роботі [22]. Кінцевим результатом прогнозування є гіперболічна залежність витрати води в розрахунковому створі річки Q_p від забезпеченості паводку p :

$$Q_p = \frac{k_1}{p} + k_2, \quad (5)$$

де k_1 і k_2 – коефіцієнти, що знаходять шляхом обробки за методом найменших квадратів статистичних даних проходження паводків за минулий період.

Етап 2. Прогнозування середньорічної витрати води в розрахунковому створі річки в зоні паводкових ризиків s . Методичні засади прогнозування наведено в роботі [22]. Кінцевим результатом прогнозування є функціональна залежність:

$$Q_p^{cp} = \frac{k_1 \ln(100 - p_0)}{100 - p_0} + k_2, \quad (6)$$

де Q_p^{cp} – середньорічна пікова витрата води в розрахунковому створі річки, m^3/s ; p_0 – мінімальна для s -ї зони паводкових ризиків розрахункова величина забезпеченості паводку, яку встановлюють згідно зі статистикою проходження паводків за минулі роки, % (зазвичай приймають $p_0 \cong 1\%$).

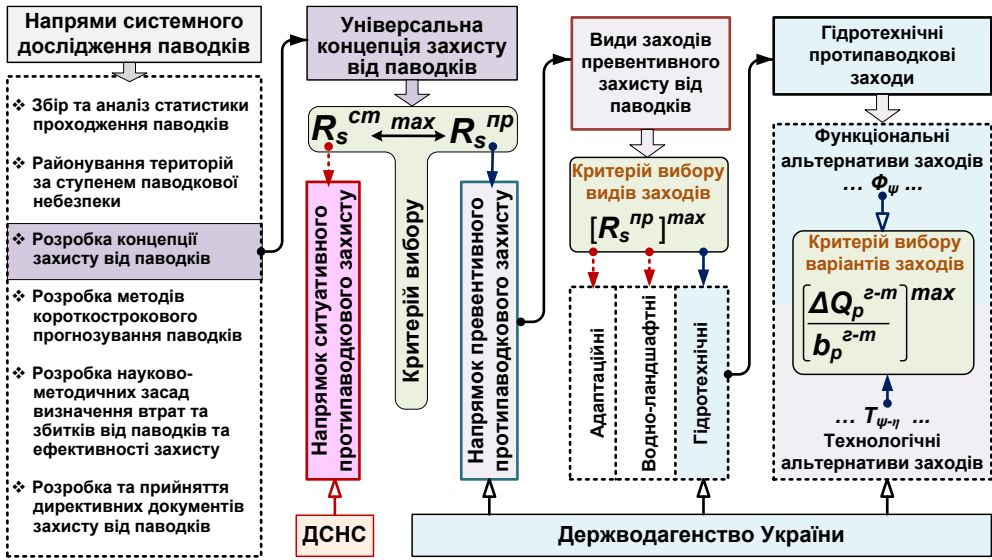


Рис. 3. Головна структурно-функціональна схема вибору за універсальною концепцією варіантів захисту від паводків s -ї зони паводкових ризиків в басейні паводконебезпечної річки

Етап 3. Прогнозування паводкової небезпеки в зоні s за розміром збитків. Методичні засади прогнозування наведено в роботі [33]. Кінцевим результатом прогнозування є гіперболічна залежність (7) загального збитку Z_s від паводку забезпеченості p в зоні паводкових ризиків s :

$$Z_s = \frac{k_3}{p} + k_4, \quad (7)$$

де k_3 і k_4 – коефіцієнти, що знаходять шляхом обробки за методом найменших квадратів статистичних даних збитків від проходження паводків за минулий період, а також даних прогнозу вартості майбутньої забудови території зони s та перспективи її подальшого економічного розвитку.

Етап 4. Прогнозування середньорічного збитку від паводків в зоні паводкових ризиків s . Методичні засади прогнозування наведено в роботі [32]. Кінцевим результатом прогнозування є залежність:

$$Z_s^{cp} = \frac{k_3 \ln(100 - p_0)}{100 - p_0} + k_4, \quad (8)$$

де Z_s^{cp} – середньорічний збиток від паводку в s -й зоні паводкових ризиків, тис. грн/рік.

Етап 5. Визначення розміру середньорічного відвернутого збитку BZ_s^{cp} в зоні паводкових ризиків s . У разі повного захисту від паводків зони s , що характерно для багатьох гідротехнічних заходів, розмір середньорічного відвернутого збитку BZ_s^{cp} дорівнює абсолютній величині середньорічного збитку Z_s^{cp} , який розраховують за формулою (8). В інших випадках величину BZ_s^{cp} розраховують за індивідуальними методиками.

Стадія обґрунтування заходів за концептуальним напрямком ситуаційного захисту від паводків.

Етап 6. Визначення середньорічних витрат $[b_s^{cm}]^{cp}$ на здійснення ситуаційних протипаводкових заходів. Середньорічні витрати $[b_s^{cm}]^{cp}$ розраховують для паводку, що має визначену за формулою (3) середньорічну витрату води Q_p^{cp} в розрахунковому створі річки в зоні паводкових ризиків s . Середньорічні витрати $[b_s^{cm}]^{cp}$ на здійснення ситуаційних протипаводкових заходів складаються з середньорічних витрат на короткострокове прогнозування паводків $[b_s^{kn}]^{cp}$, які розраховують за методами, наведеними в роботах [15, 24]; середньорічних витрат на здійснення попереджувальних заходів $[b_s^{nm}]^{cp}$; середньорічних витрат на здійснення аварійно-рятувальних заходів $[b_s^{a-p}]^{cp}$; середньорічних витрат на здійснення аварійно-відновлюваних заходів $[b_s^{a-e}]^{cp}$ [23]. Таким чином, середньорічні витрати $[b_s^c]^{cp}$ на здійснення ситуаційних заходів визначають за формулою:

$$[b_s^{cm}]^{cp} = [b_s^{kn}]^{cp} + [b_s^{nm}]^{cp} + [b_s^{a-p}]^{cp} + [b_s^{a-e}]^{cp}. \quad (9)$$

Етап 7. Визначення показника ефективності R_s^{cm} заходів, що здійснюють за концептуальним напрямком ситуаційного протипаводкового захисту. Показник R_s^{cm} розраховують за формулою:

$$R_s^{cm} = \frac{[BZ_s^{cm}]^{cp}}{[b_s^{cm}]^{cp} + (Z_s^{cp} - [BZ_s^{cm}]^{cp})}, \quad (10)$$

де $[BZ_s^{cm}]^{cp}$ – середньорічні відвернуті збитки при застосуванні в зоні s ситуаційних протипаводкових заходів, тис. грн/рік.

Стадія обґрунтування заходів за концептуальним напрямком превентивного захисту від паводків.

Етап 8. Визначення показників ефективності адаптаційних протипаводкових заходів. До варіантів адаптаційних протипаводкових заходів відносять: винос господарських і житлових будівель за межі зони затоплення; будівництво будинків та деяких господарських споруд на палях; пристосування промислового виробництва до умов періодичного затоплення, з метою мінімізації збитків від порушень виробничих циклів; трансформація сільськогосподарських угідь, під якою розуміється вирощування на полях в зоні паводкових ризиків культур, що витримують тимчасове затоплення. Для кожного θ -го варіанта адаптаційних протипаводкових заходів визначають показник ефективності $[R_s^a]_\theta$ за формулою:

$$[R_s^a]_\theta = \frac{[BZ_s^a]_\theta^{cp}}{[b_s^a]_\theta^{cp} + (Z_s^{cp} - [BZ_s^a]_\theta^{cp})}, \quad (11)$$

де $[BZ_s^a]_\theta^{cp}$ та $[b_s^a]_\theta^{cp}$ – середньорічний ефект від здійснення θ -го варіанта адаптаційних протипаводкових заходів та витрати для досягнення цього ефекту, тис. грн/рік.

З множини варіантів адаптаційних протипаводкових заходів обирають варіант з найбільшим показником ефективності: $[R_s^a]_\theta \leftrightarrow [R_s^a]_{\max}$.

Етап 9. Визначення показників ефективності водно-ландшафтних протипаводкових заходів. До варіантів водно-ландшафтних протипаводкових заходів відносять заходи, спрямовані на зміну умов формування паводкового стоку на площах водозбору. Це заходи: створення на шляху формування паводкових потоків лісосмуг та лісових масивів; створення ставків-накопичувачів; заболочування територій тощо. Для кожного j -го варіанта водно-ландшафтних протипаводкових заходів визначають показник ефективності $[R_s^{e-l}]_j$ за формулою:

$$[R_s^{e-l}]_j = \frac{[BZ_s^{e-l}]_j^{cp}}{[b_s^{e-l}]_j^{cp} + (Z_s^{cp} - [BZ_s^{e-l}]_j^{cp})}, \quad (12)$$

де $[BZ_s^{e-l}]_j^{cp}$ та $[b_s^{e-l}]_j^{cp}$ – середньорічний ефект від здійснення j -го варіанта водно-ландшафтних протипаводкових заходів та витрати для досягнення цього ефекту, тис. грн/рік.

З множини варіантів водно-ландшафтних протипаводкових заходів обирають варіант з найбільшим показником ефективності: $[R_s^{e-l}]_j \leftrightarrow [R_s^{e-l}]^{max}$.

Етап 10. Визначення показників ефективності гідротехнічних протипаводкових заходів. До гідротехнічних превентивних протипаводкових заходів відносять: заходи зі збільшення пропускної здатності річок для прискорення відведення води з зони паводкових ризиків; заходи акумулювання частини паводкового потоку перед зоною паводкових ризиків в руслах або долинах річок для зменшення надходження паводкових вод до зони паводкових ризиків; заходи будівництва гідротехнічних систем комплексного протипаводкового захисту. Системну схему та принципи формування варіантів гідротехнічних протипаводкових заходів за їх функціональними та технологічними альтернативами наведено в роботі [23]. Для кожного варіанта гідротехнічних протипаводкових заходів визначають показник ефективності $[R_s^{z-m}]_{\psi-\tau}$ за формулою:

$$[R_s^{z-m}]_{\psi-\tau} = \frac{[BZ_s^{z-m}]_{\psi-\tau}^{cp}}{[b_s^{z-m}]_{\psi-\tau}^{cp} + (Z_s^{cp} - [BZ_s^{z-m}]_{\psi-\tau}^{cp})}, \quad (13)$$

де $[BZ_s^{z-m}]_{\psi-\tau}^{cp}$ та $[b_s^{z-m}]_{\psi-\tau}^{cp}$ – середньорічний ефект від здійснення $(\psi-\tau)$ -го варіанта гідротехнічних протипаводкових заходів та витрати для досягнення цього ефекту, тис. грн/рік; ψ – індекс функціональної альтернативи заходів; τ – індекс технологічної альтернативи заходів.

З множини варіантів гідротехнічних протипаводкових заходів обирають варіант з найбільшим показником ефективності: $[R_s^{z-m}]_{\psi-\tau} \leftrightarrow [R_s^{z-m}]^{max}$.

Етап 11. Вибір найбільш ефективного виду заходів за концептуальним напрямком превентивного протипаводкового захисту зони s паводкових ризиків. Серед трьох видів превентивного протипаводкового захисту обирають вид, якому відповідає найбільший показник ефективності $[R_s^{np}]^{max}$ з множини розрахованих за формулами (11–13) показників ($[R_s^a]^{max}$, $[R_s^{e-l}]^{max}$, $[R_s^{z-m}]^{max}$).

Етап 12. Вибір найбільш ефективного концептуального напрямку протипаводкового захисту зони s паводкових ризиків. Для зони s паводкових ризиків обирають ситуаційний чи превентивний концептуальний напрямок захисту за критерієм найбільшого з двох відповідних цим напрямкам показників ефективності: R_s^{cm} ; $[R_s^{np}]^{max}$.

Висновки

1. Паводки супроводжують людство з найдавніших часів і до наших днів, що дозволяє їх сприймати як історичну категорію.

2. Паводки відбуваються в басейнах усіх річок земної кулі, а за кількістю людських жертв та заподіяних збитків займають перше місце, що дає підставу вважати проблему паводків глобальною.

3. За результатами системного аналізу основних напрямів дослідження та рішення проблеми паводків за попередні роки встановлено, що найважливішим напрямом науково-практичного рішення проблеми паводків є фундаментальне вдосконалення концептуальних засад захисту від паводків.

4. Запропоновано авторський варіант універсальної концепції захисту від паводків, в основу якої покладено цільовий показник протипаводкового захисту, за яким забезпечується максимальна ефективність захисту територій в зонах паводкового ризику.

5. За універсальною концепцією передбачено два принципово відмінні концептуальні напрямки протипаводкового захисту: ситуативний і превентивний.

6. За напрямком превентивного протипаводкового захисту передбачено три види захисних заходів (адаптаційні, водно-ландшафтні, гідротехнічні), серед яких найбільш поширеними та ефективними для захисту територій в басейнах паводконебезпечних річок є гідротехнічні заходи.

7. Використання універсальної концепції захисту від паводків забезпечує досягнення надійного захисного протипаводкового ефекту при раціональному використанні інвестиційних вкладень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бабаджанова О.Ф., Гринчишин Н.М., Сукач С.Г. (2013). Небезпека розвитку і поширення повеней // Науковий вісник НЛТУ України. 2013. Вип. 23.8. С. 90-95.
2. Авакян А.Б. (2000). Наводнения. Концепция защиты // Известия РАН, серия географическая. 2000, № 5, С. 40–46.
3. Ромащенко М.І., Савчук Д.П. (2012). Водні стихії. Карпатські повені. Статистика, причини, регулювання. Київ : Аграрна наука. 2012. 304 с.
4. Milne A. (1986). Floodshook: the drowning of planet Earth. Sutton.1986. 176 p.
5. James G. Fraser. (1975). Folk-lore in the Old Testament. London: Hart Publishing Company, Inc. 1975. 482 p.
6. Королев И.Е., Бабаянц О.М. (2018). Мифы о всемирном потопе у разных народов // Юный ученый. 2018, № 2 (16), С. 53-56.
7. Димитров П., Димитров Д. (2003) Черно море. Потопись и древните митове. Варна : Издателство «Славена». 2003. 91 с.
8. Муранов А.П. (1957). Река Хуанхэ (Желтая река). Л. : Гидрометеиздат.1957. 88 с.
9. Муранов А.П. (1959). Река Янцзы. Л. : Гидрометеиздат. 1959. 124 с.
10. Flood damage prevention and control in China. Report of a study Four and Workshop in the Peoples Republic of China // Nature. Resource. Water ser. 1983, № 11, 121 p.
11. Гамберг В. (1931). Наводнение в Китае (июль-октябрь 1931). // Проблемы Китая. 1931, № 89 (3-4), С. 153-158.
12. Zong Yongqiang, Chen Xiqing. (2000). The 1998 flood on the Yangtze, China // Natural Hazards. 2000, №22, P. 165–184.

13. Brammer H. (1990). Floods in Bangladesh, I - Geographical Background to the 1987 and 1988 Floods // *Geographical Journal. GEOAREA : Southeast Asia, Bangladesh*. 1990. Vol. 156.
14. Gentry A. H., Lopes Parody, J. (1980). Deforestation and increased flooding of the Upper Amazon. *Science*. 1980. V. 210, № 4476, P. 1354-1356.
15. Бабаджанова О.Ф., Павлюк Ю.Е., Сукач Ю.Г. (2013). Сучасні системи попередження та прогнозування повеней // *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2013, № 7, С. 167-171.
16. Інженерно-геологічний моніторинг Міжрегіонального офісу захисних масивів дніпровських водосховищ. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mozmdv.gov.ua/ravodok-ta-osnovni-momenti-jogo-negativnogo-vplivu/>. (дата звернення 17.11.2021 р.).
17. Manual on flood forecasting and warning Source(s): World Meteorological Organization (WMO), WMO-No.1072, Geneva, 2011 edition.
18. Петроченко О.В., Петроченко В.І. (2021). Аналіз термінологічних визначень стихійних явищ, пов'язаних з підвищенням рівня води у водотоках та затопленням територій // *Екологічна безпека та природокористування*. 2021, №4 (40), С. 140-148. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.139-148>
19. Дячук В.А., Сусідко М.М. (1999). Паводки в Закарпатті та причини їх виникнення // *Укр. географ. журн.* 1999, №1, С. 47–50.
20. Мороз О., Тартачинська З., Лубенець Л. (2009). Основні причини виникнення руйнівних повеней і паводків у Прикарпатті та геодезичний моніторинг як метод запобігання їм // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка»*. 2009, Випуск 2 (18), 128 с.
21. Сусідко М.М., Лук'янець О.І. (2004). Районування території України за ступенем гідрологічної небезпеки // *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2004, Вип. 253, С. 196–202.
22. Петроченко О.В., Петроченко В.І. (2020). Науково-методичне забезпечення розробки планів управління ризиками затоплення в річкових басейнах // *Екологічні науки*. 2020, №6, С. 35-44.
23. Петроченко В.І., Петроченко О.В. (2022). Систематизація паводків та протипаводкових заходів // *Меліорація і водне господарство*. 2022, №1, С. 50-59.
24. Заміховський Л.М., Клапоушак О.І. (2011). Аналіз методів і систем контролю та прогнозування рівня паводкових вод // *Нафтогазова енергетика*. 2011, №2(15), С. 99–105.
25. Методика оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру. Затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 15 лютого 2002 р. № 175.
26. Скиданенко Ю.П. (2007). Аналіз методологічних підходів до визначення збитків від природних катастроф // *Вісник СумДУ. Серія Економіка*. 2007, №1, С. 52–59.
27. Петроченко В.І., Шашук В.А. (2009). Еколого-економічна ефективність протипаводкових заходів. К. : ДУЕВР. 2009. 62 с.
28. Директива 2007/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради від 23 жовтня 2007 року «Про оцінку і управління ризиками затоплення».
29. Постанова Кабінету Міністрів України від 25 жовтня 2017 р. № 1106 «Про виконання Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони».
30. Наказ МВС України від 17.01.2018 р. №30 «Про затвердження Методики попередньої оцінки ризиків затоплення».
31. Наказ МВС України від 28.02.2018 р. №153 «Про затвердження Методики розроблення карт загроз і ризиків затоплення».
32. Постанова Кабінету Міністрів України від 4 квітня 2018 р. № 247 «Про затвердження Порядку розроблення плану управління ризиками затоплення».

33. Петроченко О.В. (2020). Оцінка і прогнозування паводкових ризиків в річкових басейнах // Екологічна безпека та природокористування. 2020, №1 (33), С. 18-41. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.1.18-41>

Стаття надійшла до редакції 15.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 15.06.2023

REFERENCES

1. Babadzhanova, O.F., Grinchishin, N.M., & Sukach, S.G. (2013). Nebezpeka rozvytku i poshyrennya povney [The danger of the development and spread of floods]. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy*, 23.8, 90-95 [in Ukrainian].
2. Avakyan, A.B. (2000). Navodneniya. Kontsepsiya zashchity. [The concept of protection]. *Izvestiya RAN, seriya geograficheskaya*, 5, 40-46 [in Russian].
3. Romashchenko, M.I., & Savchuk, D.P. (2012). Vodni stykhiyi. Karpats'ki poveni. Statystyka, prychyny, rehulyuvannya. [Water elements. Carpathian floods. Statistics, causes, regulation]. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
4. Milne, A. (1986). Floodshoock: the drowning of planet Earth. Sutton.
5. James G. Fraser. (1975). Folk-lore in the Old Testament. London: Hart Publishing Company, Inc.
6. Korolev, I.Ye., & Babayants, O.M. (2018). Mify o vseмирnom potope u raznykh narodov [Myths about the global flood among different peoples]. *Yunyy uchenyy*, 2 (16), 53-56 [in Russian].
7. Dimitrov, P., & Dimitrov, D. (2003). Cherno more. Potopūt i drevnite mitove [Black Sea. The Flood and Ancient Myths]. Varna: Izdatelstvo «Slavena».
8. Muranov, A.P. (1957). Reka Khuankhe (Zheltaya reka) [Yellow River (Yellow River)]. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
9. Muranov, A.P. (1959). Reka Yantszy [Yangtze river]. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
10. Flood damage prevention and control in China. Report of a study Four and Workshop in the Peoples Republic of China. (1983). *Nature. Resource. Water ser.*, 11, 121.
11. Gamberg, V. (1931). Navodneniye v Kitaye (iyul'-oktyabr' 1931) [Flood in China (July-October 1931)]. *Problems of China*, 89 (3-4), 153-158 [in Russian].
12. Zong Yongqiang, & Chen Xiqing. (2000). The 1998 flood on the Yangtze, China. *Natural Hazards*, 22, 165-184.
13. Brammer, H. (1990). Floods in Bangladesh, I - Geographical Background to the 1987 and 1988 Floods. *Geographical Journal*, Vol. 156.
14. Gentry, A.H., & Lopes Parody J. (1980). Deforestation and increased flooding of the Upper Amazon. *Science*, 210 (4476), 1354-1356.
15. Babadzhanova, O.F., Pavlyuk, YU.E., & Sukach, YU.H. (2013). Suchasni systemy poperedzhennya ta prohnozuvannya povney [Modern flood prevention and forecasting systems]. *Visnyk L'viv's'koho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttyediyal'nosti*, 7, 167-171 [in Ukrainian].
16. Inzhenerno-heolohichnyy monitorynh Mizhrehional'noho ofisu zakhysnykh masyviv dniprovs'kykh vodoshkovyshch [Engineering-geological monitoring of the Interregional office of protective massifs of the Dnieper reservoirs]. Retrieved November 17, 2021, from <https://www.mozmdv.gov.ua/pavodok-ta-osnovni-momenti-jogo-negativnogo-vplivu/>.
17. Manual on flood forecasting and warning Source(s): World Meteorological Organization (WMO), WMO-No.1072, Geneva, 2011 edition.
18. Petrochenko, O.V., & Petrochenko, V.I. (2021). Analiz terminolohichnykh vyznachen' stykhiynykh yavlyshch, pov'yazanykh z pidvyshchennyam rivnya vody u vodotokakh ta zatoplennyam terytoriy [Analysis of terminological definitions of natural phenomena associated with the rise of the water level in watercourses and flooding of territories].

- Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya, 4 (40), 140-148 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.139-148>
19. Diachuk, V.A., & Susidko, M.M. (1999). Pavodky v Zakarpatti ta prychny yikh vynykennia [Floods in Transcarpathia and their causes]. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 47-50 [in Ukrainian].
20. Moroz, O., Tartachyns'ka, Z., & Lubenets', L. (2009). Osnovni prychny vynykennya ruynivnykh povney i pavodkiv u Prykarpatti ta heodezychnyy monitorynh yak metod zapobihannya yim [The main causes of destructive floods and floods in the Carpathian region and geodetic monitoring as a method of their prevention]. *Suchasni dosyahnennya heodezychnoyi nauky ta vyrobnytstva: zbirnyk naukovykh prats' Zakhidnoho heodezychnoho tovarystva UTHK: Vydavnytstvo Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politehnika»*, 2(18), 128 [in Ukrainian].
21. Susidko, M.M., & Lukianets, O.I. (2004) Raionuvannya terytorii Ukrainy za stupenem hidrolohichnoi nebezpeky [Zoning of the territory of Ukraine by the degree of hydrological danger]. *Naukovi pratsi UkrNDHMI*, 253, 196-202 [in Ukrainian].
22. Petrochenko, O.V., & Petrochenko, V.I. (2020). Naukovo-metodychne zabezpechennya rozrobky planiv upravlinnya ryzykamy zatoplennya v richkovykh baseynakh [Scientific and methodological support for the development of flood risk management plans in river basins]. *Ekolohichni nauky*, 6, 35-44 [in Ukrainian].
23. Petrochenko, V.I., & Petrochenko, O.V. (2022). Systematyzatsiya pavodkiv ta protypavodkovykh zakhodiv [Systematization of floods and anti-flood measures]. *Melioratsiya i vodne hospodarstvo*, 1, 50-59 [in Ukrainian].
24. Zamikhovs'kyi, L.M., & Klapoushchak O.I. (2011). Analiz metodiv i system kontrolyu ta prohnozuvannya rivnya pavodkovykh vod [Analysis of flood water level control and forecasting methods and systems]. *Naftohazova enerhetyka*, 2(15), 99–105 [in Ukrainian].
25. Metodyka otsinky zbytkiv vid naslidkiv nadzvychainykh sytuatsii tekhnohennoho i pryrodnoho kharakteru [Methods of estimation of losses from consequences of emergencies of anthropogenic and natural character]. Zatverdzhena postanovoio Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 15 liutoho 2002 r. № 175 [in Ukrainian].
26. Skydanenko, Yu.P. (2007). Analiz metodolohichnykh pidkhodiv do vyznachennya zbytkiv vid pryrodnykh katastrof. [Analysis of methodological approaches to determining losses from natural disasters]. *Visnyk SumDU. Seriya Ekonomika*, 1, 52–59 [in Ukrainian].
27. Petrochenko, V.I., & Stashuk, V.A. (2009) Ekoloho-ekonomichna efektyvnist protypavodkovykh zakhodiv [Ecological and economic efficiency of flood control measures]. Kyiv: DIUEVR [in Ukrainian].
28. Dyrektyva 2007/60/ES Yevropeys'koho Parlamentu i Rady vid 23 zhovtnya 2007 roku «Pro otsinku i upravlinnya ryzykamy zatoplennya» [Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 «On the assessment and management of flood risks»].
29. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 25 zhovtnya 2017 r. № 1106 «Pro vykonannya Uhody pro asotsiatsiyu mizh Ukrayinoyu, z odniyeyi storony, ta Yevropeys'kym Soyuzom, Yevropeys'kym spivtovarystvom z atomnoyi enerhiyi i yikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoyi storony» [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of October 25, 2017 № 1106 «On the implementation of the Association Agreement between Ukraine, on the one hand, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their Member States, on the other hand»].
30. Nakaz MVS Ukrayiny vid 17.01.2018 r. №30 «Pro zatverdzhennya Metodyky poperedn'oyi otsinky ryzykiv zatoplennya» [Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated January 17, 2018 №30 «On approval of the Methodology for preliminary assessment of flood risks»]. Kyiv.
31. Nakaz MVS Ukrayiny vid 28.02.2018 r. №153 «Pro zatverdzhennya Metodyky rozroblennya kart zahroz i ryzykiv zatoplennya» [Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated February 28, 2018 №153 «On approval of the Methodology for developing maps of flood threats and risks»]. Kyiv.

32. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 4 kvitnya 2018 r. № 247 «Pro zatverdzhennya Poryadku rozroblennya planu upravlinnya ryzykamy zatoplennya». [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of April 4, 2018 № 247 «On approval of the Procedure for developing a flood risk management plan»]. Kyiv.
33. Petrochenko, O.V. (2020) Otsinka i prohnozuvannya pavodkovykh ryzykiv v richkovykh baseynakh [Assessment and forecasting of flood risks in river basins]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya*, 1(33), 18-41 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.1.18-41>

The article was received 15.03.2023 and was accepted after revision 15.06.2023

Петроченко Олексій Вячеславович

кандидат технічних наук, директор Інституту інноваційної освіти Київського національного університету будівництва і архітектури МОН України

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, вул. Освіти, 31

ORCID ID: 0000-0003-2184-4811 **e-mail:** a_petr89@ukr.net

UDC 692.2, 692.4

Adam Ujma, Dr. Eng., Adjunkt, Chief of the Building Physics Laboratory
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5331-6808> **e-mail:** adam.ujma@pcz.pl

Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland

PROSPECTS FOR CREATING SURFACES WITH VEGETATION ON BUILDINGS IN POLAND

Abstract. According to the World Green Building Council, energy demand in buildings will increase double, by 2050. Worldwide, construction and the built environment contribute about 39% of global carbon dioxide (28% from operational emissions, from energy needed to heat, cool and power them, and the remaining 11% from materials and construction) and 50% of the world's resource consumption. Thus, maximising energy efficiency and improving the environment are the main directions of construction development. Both tasks can be solved using green structures that connect living plants with building structures (green roofs, living facades and living interior walls). The data from the main organisations in the branch has been analysed: United Nations, The World Green Building Council, European Parliament and Council, and also Global Alliance for Buildings and Construction. They state the need for green and blue infrastructure, and sustainable urbanisation, incl. decarbonising of buildings and mitigation of urban heat islands. Greening of buildings is a measure to achieve the requirements. In addition, it improves health and well-being or increases biodiversity. Poland has the corresponding norms to stimulate the greening of buildings. The term "biologically active area" is defined as the area with an area arranged in a way that ensures natural vegetation of plants and rainwater retention; such an area also covers 50% of the surface of terraces and flat roofs with a vegetation layer with vegetation and other surfaces (e.g. green facade), providing natural vegetation of plants, with an area of not less than 10 m², surface water in this area. Special tax policies give privileges to those who green their building(s). These measures have a good result in spreading green structures, which is proved by the objects represented in the article.

Keywords: sustainability; green structures; energy efficiency; biologically active area; water retention.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.23-34>

1. Introduction

According to the World Green Building Council, energy demand in buildings will increase double [1], by 2050. Worldwide, construction and the built environment contribute about 39% [2] of global carbon dioxide (28% [2] from operational emissions, from the energy needed to heat, cool and power them, and the remaining 11% [2] from materials and construction) and 50% of the world's resource consumption [1].

Cities house more than half of the global population and account for 71...76% [3, 4] of the CO₂ emissions that lie at the heart of the climate crisis.

World Health Organization data show that almost all [5] of the global population (99%) breathe air that exceeds WHO guideline limits and contains high levels of pollutants, with low- and middle-income countries suffering from the highest exposures. Thus, we need to analyse possibilities to improve the energy efficiency and environment of cities. Both tasks can be solved using green structures that connect living plants with building structures.

2. The world experience analysis

The World Green Building Council [6] report points to the need for:

- protection of natural capital and natural resources through investment infrastructure – e.g. prioritising green infrastructure and urban areas;
- enhancing the role of blue and green infrastructure in spatial planning;
- better management of water processes to reduce the depletion of freshwater resources, m.in. through the use of construction wastewater;
- creating larger public and open green and blue areas for both nature and people in cities, reducing the urban heat island effect;
- implementing strategic protection measures – such as flood prevention measures.

A proposal to carry out a comprehensive assessment of CO₂ flows in green infrastructure systems, including buildings with vegetation (green roofs, living facades and living interior walls), over the full life cycle is presented in the diagram in Fig. 1 [7].

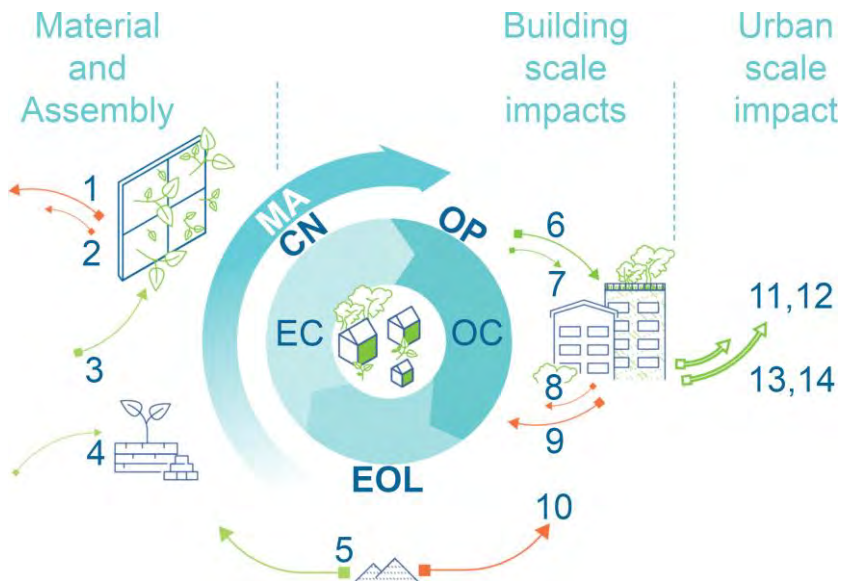


Fig. 1. Green infrastructure and biomaterial systems [7]:

1 – additional structure to carry the weight of soil and water; 2 – additional substrate and material; 3 – extended life of wall/roof material; 4 – use of carbon sequestering materials and assembly; 5 – use of recycled or byproduct materials in assembly design; 6 – reduction in heating and cooling loads; 7 – reduction in energy of ventilation; 8 – the cost of maintenance; 9 – the cost of water and fertilisers; 10 – emissions from landfill/incineration; 11 – reduction in urban heat islands; 12 – reduction in storm-water infrastructure; 13 – ongoing carbon sequestration from the living system; 14 – carbon offsets from urban agriculture; MA – material assembly; CN – construction; OP – operations; EOL – end of life; EC – embodied carbon; OC – operational carbon

The amount of carbon emissions associated with assemblies and structures should be weighed against the potential for reducing carbon emissions through reduced building cooling and/or heating loads, reduced urban heat island effects, and improved air quality and biodiversity at both a building and urban scale. This quantification of carbon dioxide emissions and reductions should be made by

analyzing the building throughout its life cycle. The final result of the assessment will largely depend on climatic conditions, thermal insulation of the building envelope, type and technical parameters of the heating/cooling system, type of fuel or energy used, type of system and plant species. According to some authors, the full reduction of carbon dioxide emissions for some facilities is achieved even after three years. These assessments do not take into account other benefits such as a positive impact on human health and well-being or an increase in biodiversity.

However, since the payback periods for these types of green building systems, taking into account energy costs, are not very encouraging, financial support in the form of incentives and appropriate municipal building codes is necessary to overcome the additional initial costs and concerns about ongoing maintenance costs.

The World Green Building Council report points to the need to design systems for protecting, collecting, and efficiently using natural resources, such as rainwater collection facilities (e.g., wells and water reservoirs, carefully selected to provide sufficient storage space during periods of drought), grey water reuse systems, low-flow amenities and water-saving devices, building green and blue roofs, or installing rain gardens for management rainwater outflow with adaptive and native vegetation [7].

According to data from the United Nations [8] Habitat in 2050 around 68% of humanity will live in cities. At now cities

- occupied only 2% of the Earth's surface;
- consume 78% of energy;
- produce more than 60% of greenhouse gas emissions.

In 2016 the United Nations itself improved the New Urban Agenda [9] to advise countries on their urbanization processes and make cities more habitable, inclusive, healthy, resilient and sustainable. This document draws attention to the challenges of increasing urbanization and suggests possible courses of action. The latest version strengthens the mission of Agenda 2030 to support sustainable urbanization. By 2030, among others, ensure universal access to safe, inclusive and accessible green and public spaces, in particular for women and children, the elderly and people with disabilities [9]. Urban policy measures are to take into account spatial and environmental aspects of revitalization and spatial planning. Poland's participation in the New Urban Agenda [10] concerns i.a. nature-based solutions and the promotion of this approach.

The roadmap for Buildings and Construction 2020-2050 [11] to fully decarbonise buildings throughout their life cycle and to support the development of national or regional strategies and policies sets out short, medium and long-term scopes for action to create a built environment that is carbon-free, efficient and resistant. It includes eight "actions": urban planning, new buildings, existing buildings, construction operations, devices and systems, materials, resilience and clean energy.

The document also guides green and blue infrastructure actions in cities. It contains guidelines with set goals and indicators that cities should achieve by 2030, 2040 and 2050.

In the case of water management, it's necessary to highlight a need to support the increased use of water management technologies, reducing the volume and speed of rainwater run-off, and increasing landscape permeability and rainwater retention. This will increase flood resilience and improve the quality of soil and underground aquifers. Measuring rainwater flow through drain pipes, tanks and drains using smart sensors gives municipal institutions the ability to identify where green infrastructure is needed to improve drainage and mitigate the effects of an urban heat island.

For vegetation, proper landscape and vegetation planning can increase resistance to excess rainwater, reduce the need for heating and cooling, and improve air quality through measures such as green roofs, green walls, trees and parks. In particular, city parks are key to improving the quality of life in cities, cooling cities and acting as sinks of greenhouse gas and other air pollutant emissions. Vegetation measures should give priority to the use of native plant species.

Mitigation of the effects of urban heat islands (UHI) should be sought [11]. Impermeable, devoid of vegetation and dark surfaces in cities tend to generate UHI effects, i.e. higher ambient temperatures. Buildings, streets, parking lots and paved surfaces absorb more heat than damp plant surfaces, which release water vapour and provide shade to cool the surrounding air. To minimize this effect and mitigate extreme heat, cities should set UHI reduction targets and implement a variety of programs to that end. Local authorities may seek to reduce impermeable surfaces, increase the preservation of large canopy volumes, create cool or green roofs and facades, or expand wetlands. Quantitative targets should be included in formal city plans and specify a future target date or annual commitments.

The latest version of the EU EPED (Energy Performance of Buildings Directive (recast)) [12] by the European Parliament and Council points to the need to integrate green infrastructure, such as living roofs and walls, into urban planning and architectural design. This can be an effective tool for adapting to climate change and reducing the harmful effects of climate change in urban areas. Buildings should take into account climatic conditions, including adaptation to climate change through green infrastructure, etc. Member States should encourage the installation of vegetation surfaces that help retain and retain water, thereby reducing urban run-off and improving stormwater management. Improving the good use and adaptation of public space surrounding buildings with elements such as wood, green roofs and facades, and solutions inspired and supported by nature.

Green structures are the universal measure to solve all of the tasks. According to the amendments to the EPBD Directive of 2023 [12], buildings in the European Union must meet the standards of zero-emissions CO₂:

- from 1 January 2026 – newly designed buildings occupied, operated or owned by public authorities;
- from January 1, 2028 – all newly designed buildings;
- by 2050, all buildings (both new and existing).

3. Polish requirements and regulations

The use of partitions of buildings with vegetation (the green roof and green facade) should contribute to achieving the objectives set out in the EPBD.

Biologically active area in the Polish Technical conditions to be met by buildings and their location [13].

According to Polish building regulations, a biologically active area [14] is an area:

- with an area arranged in a way that ensures natural vegetation of plants and rainwater retention;
- such an area also covers 50% of the surface of terraces and flat roofs with a vegetation layer with vegetation and other surfaces (e.g. green facade), providing natural vegetation of plants, with an area of not less than 10 m²;
- surface water in this area.

Polish building regulations contain requirements for a minimum biologically active area [15]:

1. On building plots intended for multi-family housing, health care buildings (except clinics) and education and upbringing, at least 25% of the plot area should be developed as a biologically active area, if a different percentage does not result from the provisions of the local spatial development plan.

2. The group of multi-family buildings covered by a single building permit provides playgrounds for children and recreational areas accessible to the disabled, according to utility needs, with at least 30% of this area located in a biologically active area, unless separate regulations provide otherwise.

This value is determined as an indicator of the biologically active area of a building plot.

A great deal of information and guidance on how to create buildings and their surroundings soon can be found in the EU guide [16]. There are guidelines for buildings with vegetation. Plants on a green facade can act as a rain cover and help lower air and surface temperatures through evapotranspiration and shading provided by tree crowns. There are several ways to build a green facade (Fig. 2). These can be [16]:

- green ground facades: evergreen or deciduous vines grow on the wall, rooted in the soil next to the facade; self-adjacent plants climb the wall as they grow, directly on the wall or on the frame connected to the wall;
- green facades without roots in the ground: plants grow on special thin layers of a substrate to reduce the weight of the green facade.

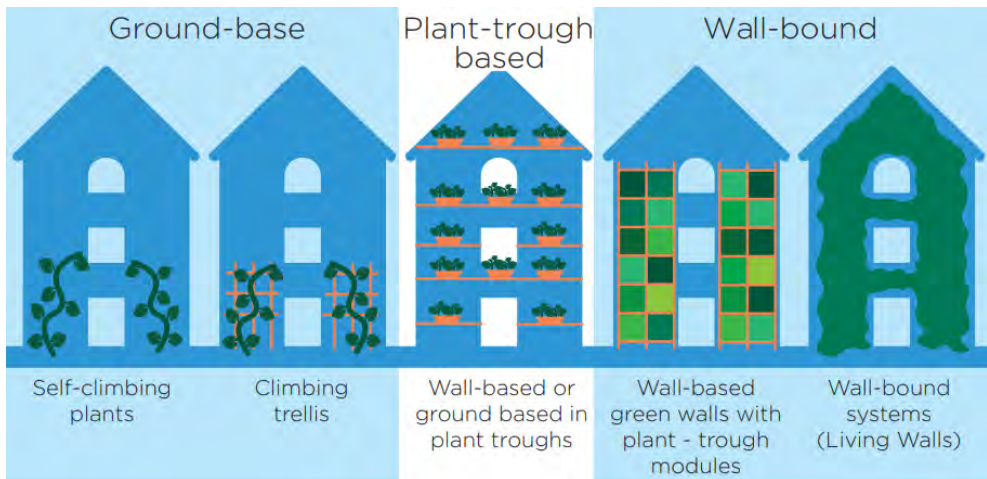


Fig. 2. Schematic drawings of different types of green facades [16]

Green roofs are adapted to heavy rainfall and protect against cold and heat waves. Such properties are primarily possessed by a green retention roof, which ensures an adequate rate of water evaporation and prevents the soil from drying out. The roofs are classified (Fig. 3) as [16]:

- extensive or standard green roofs are green roofs with a relatively thin layer of soil and vegetation. Suitable types of vegetation are succulents or, in the case of shady roofs, a mixture of mosses and herbal plants. Succulents have a high water storage capacity. Photovoltaic panels can be placed on such a roof,

which further reduces the temperature on the roof surface. Due to the relatively low weight of roofs with succulents, they can often be laid on existing roofs, up to an angle of about 35°;

- a semi-intensive green roof is a transition between extensive and intensive;
- intensive green roofs have a thicker substrate and plant layer, as well as a greater variety of plants, including shrubs, small trees and nesting sites for birds and bats. Such roofs can contribute to increasing biodiversity.

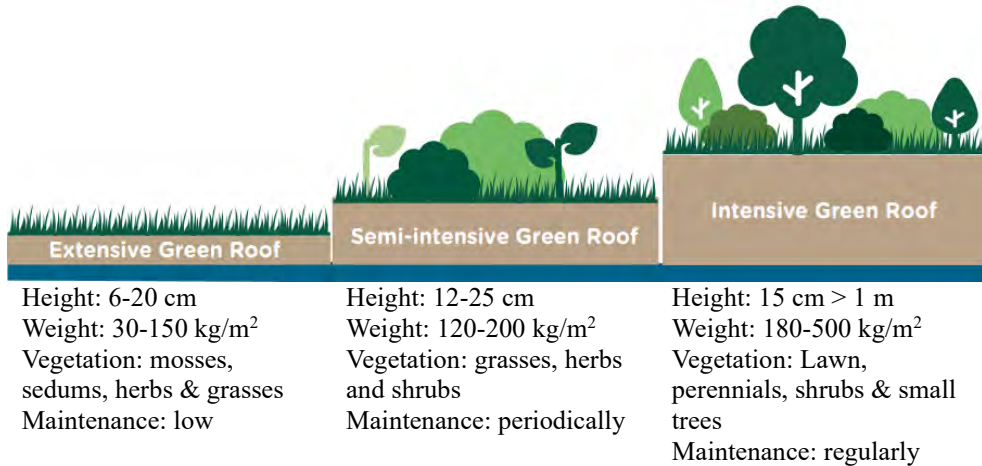


Fig. 3. Scheme and characteristics of the three basic types of green roofs [16]

A way to encourage the creation of green roofs and facades is property tax reliefs and exemptions introduced in several cities in Poland. Below in Table, there is the number of discounts in property tax, depending on the type of partition with vegetation and the area occupied by it [17]. Tax relief applies primarily to residential buildings.

In Table 1, data from Wroclaw was adopted in 2015 for residential buildings and residential premises. An example of a building with vegetation is from Wroclaw. Extensive green roof of 1600 m², intensive roof of 860 m², greenery on native land and in pots 360 m² (Fig. 4, 5) [18]. Green facade with ivy on the external walls of the National Museum in Wroclaw [19].

In Table, data from Katowice and Kalisz was adopted in 2021. Example of a green roof over the International Congress Centre in Katowice (Fig. 6) [20]. Green facade of the largest Mercure hotel building in Katowice (Fig. 7) [21]. On Fig. 8, there is an example from Kalisz [22].

In Table, data from Czestochowa adopted in 2022, established only for single-family buildings. Example of a green roof over the EXG office building in Czestochowa (Fig. 9) [23]. Green facade created on the external wall of the City Hall building in Czestochowa (Fig. 10) [24].

4. Conclusions

The international experience shows that greening of buildings allows for solving the main problems of cities such as urban heat islands and water resilience. To perform the tasks, the proper normative system is developed. In Poland, in addition, there is a system of tax reliefs which is stimulating the greening that is shown by successfully realized projects.

Table. Property tax reliefs in force in Wroclaw [17]

Type of partition with vegetation	Percentage of the area occupied by plants	Percentage of property tax relief
Wroclaw		
Green roof in a building up to 5 storeys high	50–80%	50–80%
	80–100%	80–100%
Green roof in a building with a height of more than 5 floors	50–80%	25–40%
	80–100%	40–50%
Vertical garden on the facade	< 30 m ²	20%
	30 m ² – 45 m ²	25%
	> 45 m ²	50%
Katowice and Kalisz		
Green roof	100%	100% (reduction to 50% in Katowice in buildings with a height of more than 6 storeys)
Green facade (minimum one) with vegetation rooted in the ground	-	
Vertical garden on the facade	50%	
Czestochowa		
Green roof	100%	50%
Green facade (minimum one) with vegetation rooted in the ground	50%	
Vertical garden on the facade	75%	



Fig. 4. Green roof at Botanica Residence in Wroclaw [18]



Fig. 5. Green facade on the building of the National Museum in Wrocław [19]



Fig. 6. Green roof over the International Congress Centre in Katowice [20]

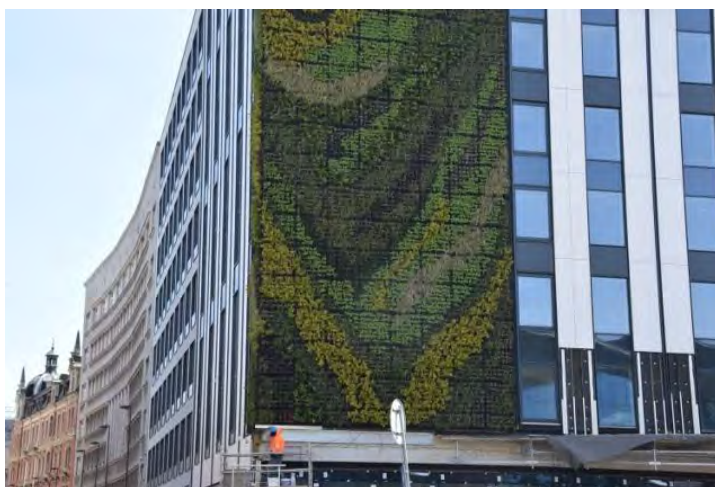


Fig. 7. Green facade on the Mercure hotel building in Katowice [21]



Fig. 8. Green facade on a building located in Kalisz [22]



Fig. 9. Green roof over the EXG office building in Czestochowa [23]



Fig. 10. Green facade created on the external wall of the City Hall building in Czestochowa [24]

REFERENCES

1. The commitment. World Green Building Council. (2023, March 31). Retrieved April 25, 2023, from <https://worldgbc.org/thecommitment/>
2. Profile of an asia pacific network partner: AGC. World Green Building Council. (2023, January 12). Retrieved April 25, 2023, from <https://worldgbc.org/article/profile-of-an-asia-pacific-network-partner-agc/>
3. IPCC (2014). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J., Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf
4. International Energy Agency. (2021). World Energy Outlook 2021. Paris, France; International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
5. World Health Organization. (2022, December 19). Ambient (outdoor) Air Pollution. World Health Organization. Retrieved April 25, 2023, from [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
6. World Green Building Council. (2022). Climate change resilience in the built environment. Principles for adapting to a changing climate. Toronto, Canada; World Green Building Council. <https://worldgbc.org/article/climate-change-resilience-in-the-built-environment-guide/>
7. United Nations Environment Programme. (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi, Kenya; United Nations. <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
8. World Economic Forum. (2021). Green Building Principles: The Action Plan for Net-Zero Carbon Buildings. Geneva, Switzerland; World Economic Forum. <https://www.weforum.org/reports/green-building-principles-the-action-plan-for-net-zero-carbon-buildings/>
9. United Nations. (2017). New Urban Agenda. Quito, Ecuador; United Nations. <https://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-English.pdf>
10. Ministry of Investment and Economic Development. (2019). Sustainable urban development in Poland: National urban policy in the context of the 2030 Agenda's Goal 11 and the New Urban Agenda. Warszawa, Poland; Ministry of Investment and Economic Development. https://www.funduszeuropejskie.gov.pl/media/72570/raport_en_final.pdf
11. Global Alliance for Buildings and Construction. (2020). GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction 2020-2050. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. Paris, France; Global Alliance for Buildings and Construction. https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/GlobalABC_Roadmap_for_Buildings_and_Construction_2020-2050_3.pdf
12. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the energy performance of buildings (recast) (2023).
13. Announcement of the Minister of Investment and Development of 8 April 2019 (2019). In: *Journal of Laws*, article no. 1065.
14. Drozd, W. (2019). Problems and benefits of using green roofs in Poland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214, 012076. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012076>
15. Pawłowska, K., & Jawecki, B. (2021). The determination of priority areas for the construction of green roofs with use of the urban area valorisation method. *Sustainability*, 13(23), 13227. <https://doi.org/10.3390/su132313227>

16. European Commission, Directorate-General for Climate Action, (2023). EU-level technical guidance on adapting buildings to climate change: best practice guidance, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2834/585141>
17. Person. (2015, July 30). Tax exemptions for green roofs or walls. Wroclaw.pl. Retrieved April 25, 2023, from <https://www.wroclaw.pl/en/tax-exemptions-for-green-roofs-or-walls>
18. Zielone Dachy. Ogrodowa Pasja. (n.d.). Retrieved April 25, 2023, from <http://www.ogrodowapasja.com.pl/nasze-realizacje/zielone-dachy/>
19. Wizyta. Muzeum Narodowe we Wrocławiu. (2018, May 21). Retrieved April 25, 2023, from <https://mnwr.pl/wizyta/>
20. International Congress Centre in Katowice: Conferences, congresses, exhibitions, concerts and sport events. www.mckkatowice.pl. (n.d.). Retrieved April 25, 2023, from <https://www.mckkatowice.pl/en/>
21. International Congress Centre in Katowice: Conferences, congresses, exhibitions, concerts and sport events. www.mckkatowice.pl. (n.d.). Retrieved April 25, 2023, from <https://www.mckkatowice.pl/en/>
22. Białas, K. (2021, October 28). Kalisz: Masz Zielony Dach Lub fasadę? Nie Zapłacisz Podatku. Magazyn WhiteMAD - moda, architektura, design w jednym miejscu. Retrieved April 25, 2023, from <https://www.whitemad.pl/kalisz-masz-zielony-dach-lub-fasade-nie-zaplacisz-podatku/>
23. Postawka-Lech, H. (2020, October 14). Mathematical Precision. EXG's headquarters in Czestochowa from OVO Grączewscy Architekci. AiB. Retrieved April 25, 2023, from <https://www.architekturabiznes.pl/en/math-precision,21856.html>
24. Zielona ściana ozdobi budynek urzędu W częstochowie. Miasto Zachęca do Tego Kroku Innych właścicieli budynków. Czestochowa Nasze Miasto. (n.d.). Retrieved April 25, 2023, from <https://czestochowa.naszemiasto.pl/zielona-sciana-ozdobi-budynek-urzedu-w-czestochowie-miasto/ga/c1-8406889/zd/64286621>

The article was received 24.02.2023 and was accepted after revision 10.05.2023

Уйма Адам

ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ОЗЕЛЕНЕНИХ ПОВЕРХОНЬ З РОСЛИННІСТЮ НА БУДІВЛЯХ У ПОЛЬЩІ

Анотація. За даними Всесвітньої ради екологічного будівництва, до 2050 року потреба в енергії в будівлях зросте вдвічі. У всьому світі будівництво та забудовані території утворюють близько 39% глобальних викидів вуглекислого газу (28% від експлуатаційних викидів, енергії, необхідної для опалення, охолодження та живлення, а решта 11% – від матеріалів і будівництва) і 50% світового споживання ресурсів. Таким чином, максимізація енергоефективності та покращення довкілля є основними напрямками розвитку будівництва. Обидві задачі можна вирішити за допомогою зелених конструкцій, які з'єднують живі рослини з будівельними конструкціями (зелені дахи, живі фасади та живі внутрішні стіни). Було проаналізовано дані основних організацій у галузі: ООН, Всесвітньої ради зеленого будівництва, Європейського парламенту та Ради, а також Глобального альянсу будівель і будівництва. Вони констатують необхідність зелено-блакитної інфраструктури, сталої урбанізації, серед іншого декарбонізації будівель та пом'якшення міських теплових островів. Озеленення будівель є заходом для досягнення цих вимог. Крім того, це покращує здоров'я та самопочуття або збільшує біорізноманіття. У Польщі є відповідні норми стимулювання озеленення будівель. Термін «біологічно активна територія» визначається як територія, яку облаштовано таким чином, що забезпечується наявність природної рослинності і затримання дощових стоків; така зона також охоплює 50% поверхні терас і плоских дахів з рослинним шаром та іншими поверхнями (наприклад, зелений фасад), що забезпечують природну рослинність, площею не менше 10 м². Спеціальна податкова

політика надає пільги власникам зелених будівель. Ці заходи дають хороший результат у розповсюдженні зелених конструкцій, про що свідчать представлені в статті об'єкти.

Ключові слова: стійкість; зелені конструкції; енергоефективність; біологічно активні площі; утримання води.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2023 і прийнята до друку після рецензування 10.05.2023

Уйма Адам

доктор інженер, ад'юнкт, Завідувач лабораторії будівельної фізики, Ченстоховська Політехніка

Адреса робоча: вул. Академічка 3, 42-201, Ченстохова, Польща, +48502326061

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5331-6808> **e-mail:** adam.ujma@pcz.pl

UDK 628.3:712.3

Tetiana Tkachenko, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies
ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 *e-mail*: tkachenkoknuba@gmail.com

Viktor Mileikovskiy, Doctor of technical sciences, Professor of the Department Heat Gas Supply and Ventilation
ORCID ID: 0000-0001-8543-1800 *e-mail*: v_mil@ukr.net

Marina Kravchenko, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies
ORCID ID: 0000-0003-0428-6440 *e-mail*: marina-diek@ukr.net

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

IMPACT OF "GREEN" ROOFS ON RAINWATER MANAGEMENT: REVIEW OF SCIENTIFIC RESEARCH AND PERSPECTIVES OF USE

***Abstract.** The multifaceted advantages of "green" technologies are analyzed, one of which is the effective management of rainwater in urbanized regions, which allows solving a number of important problems, such as: local waste disposal; reduction of runoff volumes due to evapotranspiration from vegetation and open surfaces; retention of rainwater in the soil; reduction of peak flow values due to temporary storage of water in the substrate and drainage layer; improving the quality of rainwater, which then falls into the soil or is collected in separate reservoirs for further use for technical or domestic purposes. Based on the analysis of experimental studies by world-class scientists, it is shown that for extensive "green" roofs, the average efficiency of rainwater retention is estimated between 45% and 60%, and the cumulative annual retention is about 50% and 60%, depending on the local climate. The results of a study on determining the degree of reduction of rainwater runoff from the surfaces of "green" roofs, which were conducted on two model roofs (extensive and intensive) in Poland, are given. It is well-founded that the rainwater absorbed by the layers of the "green" roof slowly evaporates over a long period of time, which means maintaining a more stable relative air humidity in the vicinity of the building. The method of determining the amount of rainwater runoff from the surface of "green" roofs, as well as determining the daily load of rainwater drainage on the analyzed site, is presented. It was established that about 44% of rainwater from torrential rains is retained in the layers of the "green" roof, and in the case of an intensity not exceeding 5 mm/day, rainwater is completely retained by both intensive and extensive roofs. The advantages of "green" technologies in the process of filtering rainwater, which can be collected in tanks and used for technical needs, are considered. The prospects of rainwater management using "green" roofing systems on roofs in different countries of the world and, in particular, in Ukraine, were analyzed. The ranking of the total area and density of "green" roofs used for rainwater management in different cities of the world for 2022 is given. The authors developed and presented a recommended system of measures for the development and implementation of "green" roofs in Ukraine.*

***Keywords:** "green" constructions; "green" roofing; rainwater; stormwater runoff; average retention efficiency; management; prospects of use.*

Т.М. Ткаченко, В.О. Мілейковський, М.В. Кравченко

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

ВПЛИВ «ЗЕЛЕНИХ» ПОКРІВЕЛЬ НА УПРАВЛІННЯ ДОЩОВИМИ ВОДАМИ: ОГЛЯД НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ

***Анотація.** Проаналізовано багатогранні переваги «зелених» технологій, однією з яких є ефективне управління дощовими водами в урбанізованих регіонах, що дозволяє вирішити ряд важливих проблем, таких як: локальна утилізація стоків; зменшення обсягів стоку, за рахунок еванотранспірації з рослинності та відкритих поверхонь; затримка дощової води в ґрунті; зменшення пікових значень стоку за рахунок тимчасового зберігання води в субстраті і дренажному шарі; поліпшення якості дощових вод, які дали потрапляють в ґрунт або збираються в окремі резервуари з метою подальшого використання в технічних чи побутових цілях. На основі аналізу експериментальних досліджень науковців світового рівня показано, що для екстенсивних «зелених» дахів середня ефективність утримання дощової води оцінюється між 45% і 60%, а сукупні річні утримання становлять близько 50% і 60%, залежно від місцевого клімату. Наведено результати досліджень по визначенню ступеня зниження стоку дощової води з поверхонь «зелених» покрівель, які проводилися на двох модельних дахах (екстенсивному та інтенсивному) у Польщі. Обґрунтовано припущення, що дощова вода, поглинена шарами «зеленого» даху, повільно випаровується протягом тривалого періоду часу, що означає підтримку більш стабільної відносної вологості повітря в околицях будівлі. Представлено методика визначення кількості відтоку дощової води з поверхні «зелених» покрівель, а також визначення добового навантаження відведення дощової води на аналізованій ділянці. Було встановлено, що близько 44% дощової води від проливних дощів затримується в шарах «зеленої» покрівлі, а в разі інтенсивності, що не перевищує 5 мм/добу, дощова вода повністю затримується як інтенсивними, так і екстенсивними дахами. Розглянуто переваги «зелених» технологій в процесі фільтрації дощової води, яку можна збирати в резервуари і використовувати для технічних потреб. Проаналізовано перспективи управління дощовими стоками з використанням систем «зеленого» покриття на дахах у різних країнах світу і, зокрема, в Україні. Наведено рейтинг загальної площі та щільності «зелених» дахів, які використовуються для управління дощовими водами, у різних містах світу за 2022 рік. Авторами розроблено та представлено рекомендовану систему заходів для розвитку та впровадження «зелених» дахів в Україні.*

***Ключові слова:** «зелені» конструкції; «зелена» покрівля; дощові води; зливові стоки; середня ефективність утримання; управління; перспективи використання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.35-53>

Вступ

Наслідком швидкої урбанізації міста є поява низки екологічних проблем, в тому числі пошук оптимальних, стійких та економічно вигідних рішень для управління дощовими водами у високорозвинених міських районах. Це критично важлива проблема, яка має місце через негативний вплив міських

дощових вод на водні та наземні екосистеми і, безпосередньо, на людину через забруднення води і повені.

Крім того, більшість міст мають окремі каналізаційні системи, призначені спеціально для обробки інтенсивного стоку, але багато з них знаходяться під землею і були побудовані багато років назад, тому дуже часто великі обсяги води затоплюють вулиці, транспортні шляхи та підвали будівель.

Існує декілька напрямів забезпечення стійкості міських територій до сильних злив та дощів.

Перший з них – використання «зелених» інфраструктурних рішень, таких як «зелені» покрівлі та «зелені» стіни, завдяки яким певна кількість води вбирається рослинами, ще деяка – залишається в субстраті, а інша частина – фільтрується за рахунок декількох шарів конструкції під рослинами, що уповільнює її рух до систем дощової каналізації.

Другий метод полягає в збиранні дощової води в спеціальні накопичувальні баки, які знаходяться на покрівлі або біля будинку, чи в конструкції ґрунту на прибудинковій території. Накопичену воду можна використовувати для побутових та технічних потреб: полив газонів, прання, змивання туалетів, миття підлог, очищення тротуарів тощо.

Третій метод полягає в поглинанні води та її відведенні природними біологічними наземними засобами-губками: водопроникні поверхні, рельєф з ухилом, природне рослинне покриття, «зелені» конструкції, дощові сади, що відповідає сучасній концепції «місто-губка» [1].

Існує ряд стратегій світового масштабу, в компетентність яких входить управління дощовими стоками, такі як:

- «LID» (Low Impact Development, США) – підхід до управління поверхневими стоками, який враховує гідрологічні процеси в природі та використовує принципи управління дощовими водами, які найбільш близькі до природних процесів.

- «SuDS» (Sustainable Drainage Systems, Великобританія) – це підхід до управління дощовими водами, який включає використання методів, що знижують обсяг дощових стоків на місці, де вони утворюються, а також забезпечують очищення води.

- «LIUDD» (Low Impact Urban Design and Development, Нова Зеландія) – система управління дощовою водою на міських територіях, зокрема, за допомогою використання технологій зберігання, затримання та очищення дощової води.

- «WSUD» (Water Sensitive Urban Design, Австралія) – це сукупність принципів, які можна застосовувати для сталого управління водними ресурсами, надаючи можливості розвитку індустрії для забезпечення більш зручних умов для життя із ефективною системою водовідведення.

Кожна стратегія має унікальні переваги та значні досягнення в області управління дощовими водами. Проте варто зазначити, що розглянуті концепції мають свої обмеження. Наприклад, їх впровадження може вимагати великих інвестицій, а також технічної та інженерної підтримки. Крім того, більшість інженерних рішень вимагають додаткового простору на периферії міських районів, який, в іншому випадку, може бути використаний для корисної інфраструктури, що робить ці технології відносно складними для впровадження.

У роботі [2] стверджується, що запровадження «зелених» конструкцій, відповідно до рекомендацій *WSUD/SuDS/LIUDD*, може бути перспективним рішенням для зменшення негативних наслідків урбанізації і, зокрема, для управління дощовими водами.

Метою роботи є розробка аналітичного імовірнісного підходу до дослідження характеристик «зеленого» даху для управління зливовими водами шляхом оцінки функції розподілу ймовірностей стоку, а також аналіз перспектив використання в різних країнах світу і, зокрема, в Україні.

Основна частина

«Зелені» конструкції – це біотехнології, які поєднують в собі архітектурні конструкції та живі рослини. В залежності від розташування, конструкції можуть бути вертикальні або горизонтальні. До вертикальних відносяться вертикальне озеленення та фітостіни, до горизонтальних – «зелені» покрівлі, зелені схили, екопарковки, дощові зелені сади та зелені придорожні дощові смуги. Для більш детального пояснення нашого підходу до класифікації та термінології «зелених» конструкцій, Ткаченко Т.М. [3, 4] розроблена схема екологізації сучасних міст. Такі конструкції можуть бути створені на нових та вже існуючих будівлях (вертикальне озеленення, «зелені» дахи, «зелені» тераси) або знизу на рельєфі («зелені» схили, екопарковки, дощові зелені сади, зелені придорожні дощові смуги).

«Зелений» дах – це один з видів «зелених» конструкцій, що являє інженерні багат шарові технології, з вегетованою верхньою поверхнею. Остання складається з субстрату та рослин. Основними підготовчими шарами для створення якісної «зеленої» покрівлі є гідроізоляція та єдина дренажна система, на яку потім накладаються інші технологічні шари, які мають різну будову, в залежності від типу «зеленої» покрівлі та виконуваних нею функцій (інтенсивна, екстенсивна), типу субстрату та рослинності. Деякі технологічні шари пристосовано для поглинання, накопичення та поступового вивільнення дощової води.

Для будівництва «зеленого» даху вибір конструкції та матеріалів надзвичайно важливий, оскільки може безпосередньо впливати на гідрологічні та теплові показники, яких необхідно досягти, а також на термін корисної експлуатації конструкції [5].

Впровадження системи «зеленого» покриття на даху є ефективним та вигідним рішенням, в порівнянні з іншими стратегіями, через можливість влаштування їх на вже існуючу конструкцію [6].

«Зелені» дахи останніми роками привертають увагу спеціалістів в різних галузях завдяки своїм різним функціям, пов'язаним з гідрологією, зеленим середовищем, енергоефективністю, якістю повітря та екологією.

Багатогранні переваги цих технологій включають: управління дощовими водами [7]; зменшення споживання енергії в будівлях [8, 9], контроль забруднення повітря, секвестрування CO₂ [10, 11], збільшення біорізноманіття [12] та зменшення ефекту міського теплового острова [13].

«Зелені» дахи, на відміну від традиційних, зберігають значну кількість дощової води і є значно привабливими для міських регіонів, де необхідно усунути серйозні екологічні наслідки надмірного або неконтрольованого стоку [14].

Як показали багато авторів [15-18], системи «зелених» дахів пропонують рішення таких проблем, пов'язаних з управлінням дощовими водами, як:

- локальна утилізація стоків;
- зменшення обсягів стоку, за рахунок евапотранспірації з рослинності та відкритих поверхонь;
- затримка дощової води в ґрунті;
- зменшення пікових значень стоку за рахунок тимчасового зберігання води в субстраті і дренажному шарі;
- поліпшення якості дощових вод, які фільтруються через мембрани «зелених» дахів, а потім потрапляють в ґрунт або збираються в окремі резервуари з метою подальшого використання в технічних чи побутових цілях.

Тобто, вони дозволяють воді випаровуватися і поглинатися ґрунтом та рослинами на даху, тим самим зменшуючи кількість води, що стікає в систему дощової каналізації. Таким чином, лише частина дощової води фільтрується через ґрунтовий та дренажний шари, а потім спрямовується в каналізацію [19].

Багато науковців проводили дослідження систем «зелених» дахів в усьому світі з точки зору їх продуктивності в управлінні зливовими водами. Так, для екстенсивних «зелених» дахів (з глибиною підкладки < 15 см) середня ефективність утримання дощової води оцінюється між 45% [20] і 60% [21], а сукупні річні утримання становлять близько 50% [22] і 60% [23].

Автори [7] розробили гідрологічну модель «зеленої» покрівлі та дослідили довгострокові показники з точки зору вмісту вологи, випаровування та утримання. Було виявлено, що рівень утримання дощової води коливався від 28 до 84% ($\pm 5\%$) залежно від місцевого клімату, а продуктивність утримання можна покращити за допомогою оптимізації конфігурації.

Інші автори [24] розробили модель водного балансу для вивчення показників утримання дощової води «зеленою» покрівлею на основі метеорологічних даних за 11 років. Середньорічне утримання становило від 30 до 73,8%, залежно від місцевих кліматичних умов, які відіграють першочергове значення для гідрологічних характеристик «зелених» дахів.

Так, у дослідженні [25] була розроблена модель водного балансу для оцінки швидкості випаровування з поверхні «зелених» дахів, з метою моделювання річної ефективності утримання води цими конструкціями. Чотири міста, розташовані в різних кліматичних регіонах Китаю, були відібрані для порівняння їхніх середньорічних і сезонних показників утримування стоку великими «зеленими» дахами з використанням 11-річних метеорологічних даних, а також оцінки впливу накопичувальної ємності субстрату, параметрів типів рослинності та режиму опадів. Результати показали, що середньорічне утримання стоку в сухому континентальному кліматі Ланьчжоу становило 73,8%, що було вище, ніж у вологих кліматичних регіонах Пекіна (48,9%), Чунціна (45,2%) і Шеньчженя (30,0%). Ефективність утримування стоку екстенсивними «зеленими» дахами значно знизилася зі збільшенням кількості опадів, а більш тривалий період сухої погоди – призвів до кращого утримання стоку.

Інше дослідження, проведене дослідницькою групою в Канаді, прийшло до висновку, що показники утримання дощової води «зеленими» дахом

становили 21 і 100% під час вологого та літнього сезонів, відповідно [26]. Хоч дослідження і дало суттєві результати про характеристики «зеленого» даху, проте щодо інтенсивності опадів у роботі не повідомлялося.

В цілому, водоутримуюча здатність «зелених» покрівель є непостійною і коливається від низького відсотка до 100%, що залежить від таких факторів, як ухил «зеленої» покрівлі, товщина і тип підкладкового шару, вид рослинності, а також кількість води, накопиченої в її структурі, до наступних дощових опадів [27]. Утримання дощових вод різними типами «зелених» покрівель в залежності від місця розташування та типу субстрату представлено в таблиці 1, з якої слідує, що не обов'язково влаштовувати велику інтенсивну «зелену» покрівлю для управління дощовими стоками, а ефективний результат, щодо відсотку утримання, можна досягнути за допомогою екстенсивних дахів.

Табл. 1. Утримання дощових вод різними типами «зелених» покрівель в залежності від місця розташування та типу субстрату

Тип «зеленої» покрівлі	Місце розташування «зеленої» покрівлі	Тип субстрату	Товщина підкладки, см	Утримання дощового стоку, %
Екстенсивний та інтенсивний	Нідерланди	Дрібний пісок, підгрунтовий торф, верхній шар ґрунту – глинистий торф, мох-сфагнум	5, 10, 20, 40, 60 і 80	Від 55 до 75
Інтенсивний	Гонконг, Китай	Суглинний пісок, супіщаний ґрунт, розкладений граніт, природний сапролітний ґрунт з гідрофільним мінеральним шаром кам'яної вати	40 і 80	Від 39 до 43
Екстенсивний	Лондон, Великобританія	Легкий субстрат, що перекриває дренажний шар	5	В середньому 34
Екстенсивний	Йоркшир, Великобританія	Дрібна подрібнена цегла, дрібна подрібнена черепиця	20	44
Екстенсивний	Сеул, Корея	Вулканічні матеріали і ґрунт з мохом-сфагнумом, перлітом і дренажною плитою	20	Від 43 до 61

Тип «зеленої» покрівлі	Місце розташування «зеленої» покрівлі	Тип субстрату	Товщина підкладки, см	Утримання дощового стоку, %
Екстенсивний	Салерно, Італія	Суміш білявого і бурого торфу, цеолітів і некомпостованого ґрунту (кокосових волокон) і мінерального добрива	15	Від 50 до 100
Екстенсивний	Генуя, Італія	Гравій вулканічної породи (70%) з пемзою і торфом або з пемзою, цеолітом і торфом	20	В середньому 85
Інтенсивний	Варшава, Польща	Промитий пісок з мінеральними домішками (халцедоніт, цегла), торфом і компостом	4	В середньому 54
Екстенсивний	Тарту, Естонія	Торф'яний субстрат (66%) з гумусом (30%) і глиною (4%)	10	87,5
Інтенсивний	Варшава, Польща	Промитий пісок, халцедон, глина, торф і компост з керамзитом	15	67,5

Більшість досліджень, присвячених дослідженням впливу «зелених» дахів на управління дощовою водою, спрямовані лише на встановлення швидкості утримання дощових стоків «зеленими» дахами або на визначення відсоткового зменшення стоку води через шари даху (інтенсивний або екстенсивний) [28]. Найчастіше автори не розглядають проблему мінливості добової кількості опадів і те, як вона впливає на процес зменшення дощової води, що стікає із «зеленого» даху в систему водовідведення.

В роботі [29] було проведено дослідження по визначенню ступеня зниження стоку дощової води з поверхонь «зелених» покрівель на двох модельних дахах у Польщі, які відповідають, відповідно, екстенсивним (рис. 1, а) і інтенсивним покрівельним конструкціям (рис. 1, б). Дощова вода з дренажного шару скидалась у мірні резервуари під кожною моделлю (рис. 1, в).

В дослідженнях також вимірювали відносну вологість повітря безпосередньо над рослинністю, що покриває «зелені» моделі даху. У бездощові дні було встановлено, що відносна вологість повітря біля «зеленого» даху до 5% вище, ніж в околицях будівлі, де розташовувалися моделі. Це підтверджує припущення про те, що дощова вода, поглинена шарами «зеленого» даху, повільно випаровується протягом тривалого періоду часу, що означає більш стабільну (сприятливу для якості повітря) відносну вологість повітря в околицях будівлі.

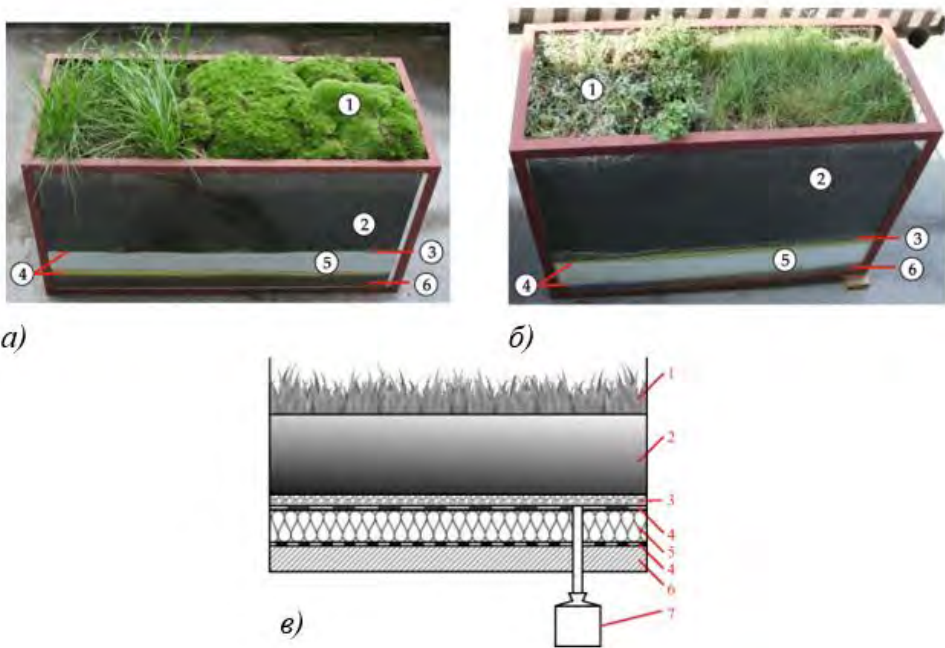


Рис. 1. Модель «зеленої» покрівлі, що використовувалась в експериментальних дослідженнях роботи [29]:

a – екстенсивна модель даху; *б* – інтенсивна модель даху; *в* – схема в розрізі, де: 1 – рослини, 2 – шар ґрунту, 3 – дренажний шар, 4 – шар контролю пари, 5 – ізоляційний шар, 6 – бетонна плита, 7 – вимірювальний бак

Як показали багато авторів у своїх дослідженнях, інтенсивні дахи зменшують стік дощової води в каналізаційну систему більше, ніж великі (екстенсивні) дахи [28].

Для того щоб визначити кількість відтоку дощової води з поверхні «зелених» покрівель на аналізованій ділянці, авторами [28] запропоновано наступну методику розрахунку:

$$LDR = \sum_i A_i \cdot RR_i \cdot CMC \cdot R, \text{ дм}^3/\text{день}, \quad (1)$$

де: *i* – тип зеленого даху: 1 – екстенсивний, 2 – інтенсивний;

A – поверхня покрівель заданого типу в аналізованій зоні;

R – добова кількість опадів (мм/добу).

Також була запропонована формула для визначення добового навантаження відведення дощової води на аналізованій ділянці, у вигляді:

$$LD = A_R \cdot R - LDR, \text{ дм}^3/\text{день}, \quad (2)$$

де: *A_R* – випробувальний майданчик, обладнаний каналізацією дощової води (м²).

За даною методикою було встановлено [30], що близько 44% дощової води від проливних дощів затримується в шарах «зеленої» покрівлі, а в разі інтенсивності, що не перевищує 5 мм/добу, дощова вода повністю затримується як інтенсивними, так і екстенсивними дахами.

Перевага «зелених» покрівель в урбоценозах полягає не тільки в зниженні навантаження на зливові стоки, а й у фільтрації дощової води, яку можна збирати в резервуари і використовувати для технічних потреб [31].

Через зростання тарифів на воду використання дощової води стає все більш виправданим рішенням. Науковці в різних країнах світу вважають, що незабаром можливість використання дощової води буде так само актуально, як, наприклад, розділення відходів. За статистикою, 60% питної води можна заощадити, використовуючи дощову воду, що є не лише економічно вигідним, а й дозволяє зберегти найцінніший ресурс [32].

У роботі [32] розраховано, що з інтенсивної плоскої «зеленої» покрівлі, площею 200 м², можна зібрати 5 м³ очищеної дощової води, що вистачить на технічні потреби сім'ї з 4 чоловік. У цьому випадку загальна потреба для будинку і поливу саду становить 111 м³/рік та добова потреба – 0,341 м³/день.

В рамках іншої роботи [33] за оригінальною авторською методикою професора Ткаченко Т.М. було зроблено розрахунок утриманого поверхневого стоку покрівлею німецького виробника, який показав, що для збору дощової води з інтенсивної плоскої покрівлі площею 150 м² для офісного колективу з 8 осіб необхідний резервуар об'ємом 4 м³. При цьому сумарні потреби на будинок і полив саду становлять 178,5 м³/рік, а щоденні потреби – 0,5035 м³/добу.

Збирання дощової води є загальновідомою практикою, яка сягає доісторичних часів [34] та визначається як збір дощової води з поверхні дахів з метою забезпечення водою побутового або іншого використання.

Однією з проблем, пов'язаних із впровадженням таких систем, є переповнення резервуарів, що порушує будь-яку передбачувану вигоду від управління зливовими водами.

Щоб вирішити цю проблему, автори [35] проконтролювали роботу резервуару для збору дощової води з технологією управління в реальному часі, які часто називають «розумними» технологіями, що збирає стік зливових вод із «зеленого» даху протягом періоду, близького до п'яти років. Було кількісно оцінено ряд додаткових переваг управління зливовими водами, які надає резервуар в межах «зеленого» даху.

Щодо питання фільтрації дощової води, у роботі [36] експериментально проаналізовано якість дощової води, що зливається в прототип «зеленого» даху, для цілей повторного використання. Отримані результати, які аналізувалися, включають колірність, каламутність, рН, аміак, азот, нітрити, нітрати, ортофосфати, загальне число коліформ та термотолерантних коліформ. Більшість оцінених параметрів були в межах ГДК, тоді як ортофосфатів, фекальних коліформ, показників кольорності та каламутності не було виявлено, тому авторами зроблено висновок, що залучення «зелених» дахів в систему менеджменту дощовими водами демонструє потенціал та переваги – як альтернативу для боротьби з водною кризою.

Управління дощовими стоками з використанням систем «зеленого» покриття на дахах сьогодні стрімко розвивається у багатьох країнах світу, проте деякі з них виділяються своїми досягненнями та популярністю даного підходу.

З глобальної точки зору, політика впровадження систем «зелених» дахів для управління дощовими водами, в основному, зосереджена в Європі та Північній Америці, а зобов'язання згідно із законами є єдиною політикою поширення цих технологій, доступною на всіх чотирьох континентах.

Згідно зі статистикою, у 2022 році (рис. 2) більшість міст зі значною щільністю «зелених» дахів, які використовуються для управління дощовими стоками, знаходяться в Австрії, Німеччині та Швейцарії, які вперше прийняли політику впровадження та поширення цих технологій. Серед них Базель (Швейцарія) має найбільшу площу «зелених» дахів на душу населення (5,71 м²), за ним йдуть Штутгарт і Лінц. Відповідно до будівельного законодавства 1996 року, Базель зобов'язує до встановлення «зелених» конструкцій на плоскі дахи всіх нових і відремонтованих об'єктів, виділяючи матеріальні кошти на підтримку цієї ініціативи [37].

З глобальної точки зору, найбільш рання індустрія «зелених» дахів з'явилася в Німеччині, яка вже понад 40 років проводить політику їх впровадження та є найдосконалішою країною у світі в цій галузі.

Німеччина почала просувати будівництво «зелених» дахів ще в 1970-х роках. У 1975 році утворення Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau (FLL), що базується в Бонні, Німеччина, зміцнило ядро національних інтересів щодо розвитку «зелених» дахів [38], а в 1982 році законодавство зробило їх впровадження обов'язковим.

Якщо розглядати кількість «зелених» дахів у абсолютних значеннях, то в Німеччині існує понад 10 000 «зелених» дахів, загальною площею 14 млн м². За останніми даними, на 2022 рік у Німеччині близько 14% дахів облаштовано зеленими насадженнями, які можуть використовуватись для керування дощовими водами. Однак у деяких містах цей відсоток може бути значно вищим, наприклад у Берліні понад 25% дахів облаштовано «зеленими» конструкціями.

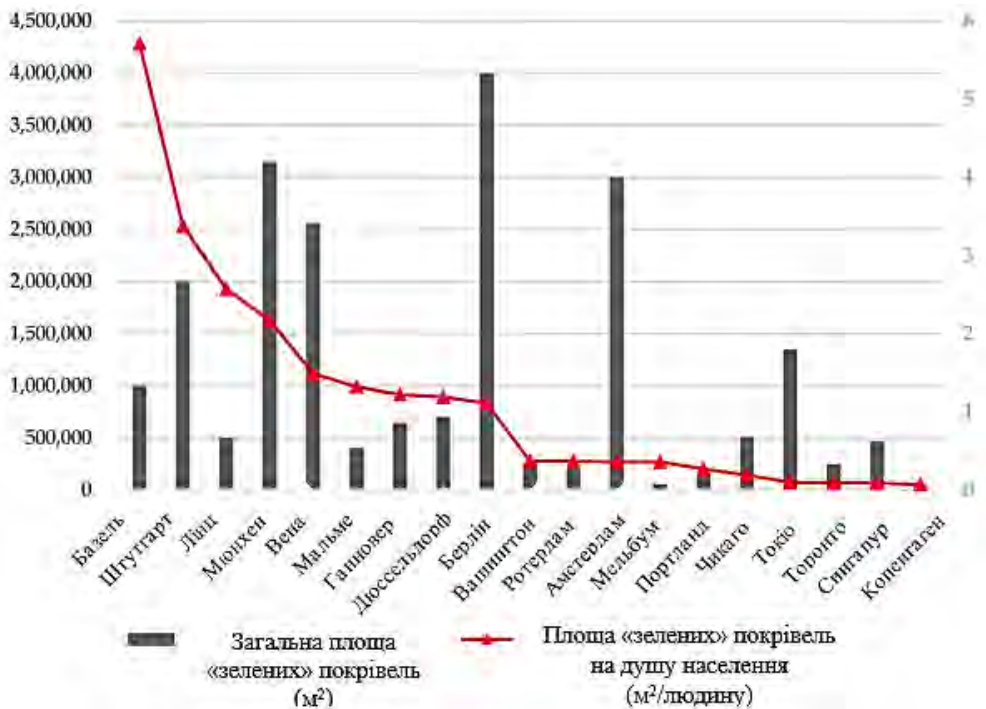


Рис. 2. Рейтинг загальної площі та щільності «зелених» дахів, які використовуються для управління дощовими водами, у різних містах світу (2022 рік)

Крім того, окрім рекомендацій FLL [39], які широко використовуються як еталонна основа для проектування, будівництва, обслуговування та регулювання «зелених» дахів у всьому світі, у Німеччині існує декілька програм та документів, які стимулюють використання «зелених» дахів для управління дощовими водами та зменшення негативного впливу антропогенної діяльності на довкілля. Основні з них: закон про підтримку використання «зелених» дахів (Dachbegrünungsgesetz); програма підтримки «зелених» дахів в містах (Green Roof Program for Cities); програма підтримки «зелених» дахів для приватних осіб (Green Roof Program for Private Individuals); закон про «зелені» дахи та «зелені» стіни (Gründach- und Fassadenbegrünungsgesetz). Всі ці нормативні документи стимулюють використання «зелених» конструкцій в будівництві та надають фінансову підтримку для їх встановлення і реконструкції.

За останні 15 років, у зв'язку зі зростанням ризику порушення екологічної стійкості, впровадження систем «зелених» дахів значно зросло. В даний час такі країни, як США, Канада, Австралія, Сінгапур і Японія, активно виступають за поширення «зелених» технологій [40].

Лінц, Австрія, було одним з перших міст у світі, яке запровадило політику поширення «зелених» дахів з метою ефективного керування зливовими водами. У 1989 році муніципальний уряд надав субсидії для заохочення розвитку цих технологій, а міські будівельні норми вимагали встановлення «зелених» дахів на нові будівлі [38].

Хоча розвиток «зелених» конструкцій в Північній Америці почався пізніше, ніж в Європі, в останні роки цей напрямок швидко розвивається. Green Roofs for Healthy Cities (GRHC), найбільша організація з поширення «зелених» дахів в Північній Америці, зіграла важливу роль у сприянні розвитку цієї галузі. В останні роки GRHC бере безпосередню участь у розробці політики в декількох містах і, навіть, розробила калькулятор «зелених» дахів (GreenSave Calculator) для вирішення питання вартості [41].

Крім того, GRHC і Фонд «зеленої» інфраструктури (Green Infrastructure Foundation) працюють над розробкою комплексної системи оцінки продуктивності для «зелених» дахів і «зелених» стін під назвою «The Living Architecture Performance Tool (LAPT)» [41].

Згідно зі звітом Green Roofs for Healthy Cities 2020 Industry Survey, у США було встановлено близько 4,3 млн м² «зелених» дахів у 2019 році, що становить приблизно 13% ринку «зелених» дахів у світі.

В Азії, на відміну від європейських та американських країн, міська забудова з високою щільністю, що призводить до знищення зелених насаджень, прискорила впровадження «зелених» технологій. Хоча Сінгапур визнаний на міжнародному рівні лідером за створенням зелених насаджень на даху, щільність «зелених» дахів є невелика в порівнянні з європейськими та американськими містами. Його програма Skyrise Greenery заохочує до розвитку «зелених» технологій, а схема стимулювання зелених насаджень Skyrise (SGIS), випущена в 2009 році, підтримує 50% витрат на встановлення «зелених» дахів.

Японський уряд почав надавати позики під низькі відсотки власникам садів на даху в 1999 році. Національний закон про будівництво 2005 року вимагає, щоб нові квартири або офісні будівлі в міських районах покривали 20% «зелені» дахи [37].

Китай є однією із країн з найбільш концентрованим розподілом міст високої щільності забудов [38]. Зі стрімким розвитком урбанізації щільність забудови збільшується, а міські зелені насадження зменшуються. Незважаючи на деякі заходи, які були вжиті провідними містами Китаю, практика впровадження «зелених» конструкцій все ще відстає, в порівнянні з західними країнами та іншими азійськими аналогами, такими як Сінгапур і Японія. Згідно з глобальною статистикою за 2018 рік, площа «зелених» дахів на душу населення в розвинених містах Європи та Америки становить понад 1,0 м², в той час як у таких містах Китаю, як Шеньчжень, Пекін та Шанхай, лише 0,21 м², 0,1 м² і 0,09 м², відповідно.

Пекін є одним з перших міст, в якому було побудовано «зелені» дахи в Китаї, а також є лідером у просуванні цих конструкцій у північних містах. У 1983 році сад на даху пекінського готелю Great Wall став першим масштабним проєктом «зеленого» даху на півночі Китаю. У 2004 році «Пекінське планування будівництва міського середовища» вимагало, щоб 30% дахів багатопверхівок і 60% дахів малоповерхових будинків були озеленені, в першу чергу, з метою керування дощовими стоками. У 2005 році «Пекінський кодекс «зеленого» даху (DB11/T281-2005)» став важливою основою для будівництва та управління в галузі «зелених» технологій у Пекіні та північних містах.

Щодо України, останніми роками спостерігається зростання інтересу до використання «зелених» технологій і можливостей регулювання ними дощових стоків, проте науково-технічні розробки, результати досліджень щодо їх впровадження та методики щодо розрахунку вторинного використання дощових вод на сьогодні практично відсутні.

Вагомий внесок у галузь досліджень «зелених» конструкцій внесла автор [42], розробивши та вдосконаливши ряд методологій: оцінки рівня секвестрації CO₂ біомасою «зелених конструкцій»; визначення термічного опору рослинного шару та «охладжувального ефекту»; розрахунку утриманого поверхневого стоку «зеленою» покрівлею; розрахунок об'єму резервуара на базі методики Wilo, адаптованої до кліматичних умов України.

Крім того, автори Ткаченко Т.М. та Мілейковський В.О. беруть безпосередню участь у формуванні нормативної бази впровадження «зелених» технологій в Україні, зокрема розробляють проєкт ДБНВ.2.6-_:202_ «Зелені» конструкції, одним із позицій якого є управління зливовими водами.

Для того щоб впровадження «зелених» дахів в Україні в майбутньому набувало більшої актуальності та поширення, необхідно розробити та реалізувати комплексну програму, яка б охоплювала систему заходів, запропоновану авторами і представлену на рис. 3.

Обов'язкова політика передбачає дві складові: *законодавчу* політику, в межах якої необхідно створювати та впроваджувати законодавчу базу щодо впровадження «зелених» конструкцій в Україні (нормативні акти, кодекси та стандарти) та *регуляторну* політику, яка передбачає державне регулювання в сфері інноваційного використання інструменту планування фактора зелених насаджень.

Політика стимулювання повинна включати два напрямки реалізації: *фінансову* політику (створення дослідницьких фондів для «зелених» конструкцій, запуск схеми фінансування, виділення низьковідсоткових кредитів) та *оціночну* політику (включення елементів «зелених» конструкцій в

існуючі або новостворені системи, пов'язані з екологічним сталим розвитком, розробка комплексної системи оцінки ефективності «зелених» конструкцій, встановлення системи маркування).



Рис. 3. Рекомендована система заходів для розвитку та впровадження «зелених» дахів в Україні

Політика допомоги на державному та регіональному рівнях має на меті реалізацію політики *організації* (створення асоціацій, організацій та установ для дослідження «зелених» конструкцій, забезпечення професійної підготовки, сприяння підвищенню обізнаності громадськості) та *інформаційну* політику (надавати платформи для обміну знаннями, організація конференцій різного рівня, семінарів, конкурсів тощо).

Крім цього, велике значення має формування загальної громадської думки з використанням засобів масової інформації, проведенням опитувань, експерсій на наявні «зелені» конструкції тощо.

Висновки

«Зелені» дахи можуть стати ефективним засобом управління дощовими водами, покращуючи їх кількісні та якісні показники, зменшуючи ризики повеней та інших проблем, пов'язаних з надмірним накопиченням води. Результати численних наукових досліджень свідчать про те, що «зелені» дахи дозволяють значно зменшувати кількість дощових вод, що надходять до каналізації та дренажних систем, а також фільтрувати дощову воду до фізико-хімічного складу, придатного для використання у технічних цілях. Водоутримуюча здатність «зеленої» покрівельної системи залежить від кількох причинно-наслідкових факторів, таких як: місцеві кліматичні умови (включаючи обсяг і характер опадів, середні температури і вологість), попередні умови вологості, глибина субстрату та його гідралічні

характеристики, ємність накопичувального/дренажного шару, характеристики рослинного покриву та нахил «зеленого» даху, а також щільності забудови в міських умовах.

З кожним роком публікується все більше і більше статей на тему впливу «зелених» дахів на керування дощовими водами, але широких оглядів, які дають такий необхідний переріз цієї галузі досліджень і систематично подають дані та визначають існуючі прогалини, мало.

У зв'язку з цим науково-практична співпраця між науковцями, політиками та практиками в майбутньому є важливою для передачі нових знань про «зелені» технології, допомагаючи містам та міським регіонам, зокрема в Україні, розробляти відповідні стратегії їх впровадження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Глушенко Р.О., Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О. Ефективне відведення дощової води з доріг дощовими садами-смугами у концепції міста-губки // Екологічна безпека та природокористування. 2021. № 4 (40). С. 46-59. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.46-59>
2. Mohammad A. Alim, Ataur Rahman, Zhong Tao, Brad Garner, Robert Griffith, Mark Liebman. 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. 2022. Volume 362. 132561. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132561>
3. Ткаченко Т.М. Проблеми класифікації та використання «зелених конструкцій» в екологізації сучасних міст // Екологічні науки: науково-практичний журнал. 2018. № 1(20). Т.2. С. 21-24.
4. Ткаченко Т.М. Проблеми класифікації та використання «зелених конструкцій» у екологізації сучасних міст. Архітектура. Будівництво. Дизайн // III Міжнар. наук.-практичн. конгрес: «Міське середовище – XXI ст.», тези доповідей. 2018. С. 50-52.
5. Florence Rezende Leite, Maria Lúcia Pereira Antunes. Green roof recent designs to runoff control: A review of building materials and plant species used in studies // Ecological Engineering. 2023. Volume 189. 106924. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106924>
6. Mohammad A. Alim. Experimental investigation of a multilayer detention roof for stormwater management // Journal of Cleaner Production. 2023. Volume 395. 136413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136413>
7. Jing Yan, Shouhong Zhang, Jianjun Zhang. Stormwater retention performance of green roofs with various configurations in different climatic zones // Journal of Environmental Management. 2022. Volume 319. 115447. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115447>
8. Dorin Maier. Perspective of using green walls to achieve better energy efficiency levels. A bibliometric review of the literature // Energy and Buildings. 2022. Volume 264. 112070. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112070>
9. Elmira Jameia. Review on the cooling potential of green roofs in different climates // Science of The Total Environment. 2021. Volume 791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721034781>
10. Mohammad Reza Seyedabadi, Mohsen Karrabi, Jafar Nabati. Investigating green roofs' CO₂ sequestration with cold- and drought-tolerant plants (a short- and long-term carbon footprint view) // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Volume 29. P. 14121–14130. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16750-w>
11. Victor G. Pessoa, Cristiane Guiselini, Abelardo A. de A. Montenegro, Heliton Pandorfi, José A. D. Barbosa Filho, Thais F. da S. Vicente. Carbon sequestration by plant species used in green roofs across different periods // Rev. bras. eng. agríc. ambient. 2022. Volume 26 (6). <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n6p407-411>

12. Wooster E.I.F., Fleck R., Torpy F., Ramp D., Irga P.J. Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study // *Building and Environment*. 2022. Volume 207, Part A. 108458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108458>
13. Jiawei Fu, Karine Dupre, Silvia Tavares, David King, Zsuzsa Banhalmi-Zakar. Optimized greenery configuration to mitigate urban heat: A decade systematic review // *Frontiers of Architectural Research*. 2022. Volume 11, Issue 3. P. 466-491. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.12.005>
14. Wen Liu, Qi Feng, Weiping Chen, Wei Wei, Ravinesh C. Deo. The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments // *Journal of Hydrology*. 2019. Volume 569. P. 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.066>
15. Agnieszka Szpak, Joanna Modrzyńska, Joanna Piechowiak. Resilience of Polish cities and their rainwater management policies // *Urban Climate*. 2022. Volume 44. 101228. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101228>
16. Gilbert Osayemwenre, Otolorin Adelaja Osibote. A Review of Health Hazards Associated with Rainwater Harvested from Green, Conventional and Photovoltaic Rooftops // *International Journal of Environmental Science and Development*. 2021. Vol. 12, No. 10. e7e6639410ac4d63ba8569f7e40cda02550c.pdf (semanticscholar.org)
17. Sylvana Melo dos Santos, Érika Pinto Marinho, Glenda Cordeiro de Oliveira Lima, Everton Santos de Barros, Yan Ranny Machado Gomes. Green roof drained rainwater quality assessment: a physicochemical analysis from a case study in Northeastern Brazil // *Sustainable Water Resources Management*. 2022. Volume 8. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-022-00698-x>
18. Procaccini G., Monticelli C. a Green Roof Case Study in the Urban Context of Milan: Integrating the Residential and Cultivation Functions for Sustainable Development // *Water*. 2021. Vol. 13(2), 137. doi: <https://doi.org/10.3390/w13020137>
19. Baryła A., Karczmarczyk A., Bus A. Role of substrates used for green roofs in limiting rainwater runoff // *Journal of Ecological Engineering*. 2018. 19(5):86-92. <https://doi.org/10.12911/22998993/91268>
20. Jeroen Mentens, Dirk Raes, Martin Hermy. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? // *Landscape and Urban Planning*. 2006. Volume 77. Issue 3. P. 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
21. Haowen Xie, Jun Liu, Mark Randall. Impact of structural factors on green roof runoff – A field investigation and statistical analysis // *Journal of Hydrology*. 2022. Volume 613, Part A. 128345. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128345>
22. Virginia Stovin, Simon Poë, Christian Berretta. A modelling study of long term green roof retention performance // *Journal of Environmental Management*. 2013. Volume 131. P. 206-215. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.026>
23. Ju Young Lee, Min Jung Lee, Mooyoung Han. A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs // *Journal of Environmental Management*. 2015. Volume 152. P. 171-176. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.028>
24. Yongwei Gong, Dingkun Yin, Junqi Li et al. Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments // *Science of The Total Environment*. 2019. Volume 687. P. 505-515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.100>
25. Wen Liu, Bernard A. Engel, Qi Feng, Ruolin Li. Simulating annual runoff retention performance of extensive green roofs: A comparison of four climatic regions in China // *Journal of Hydrology*. 2022. Volume 610. 127871. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127871>
26. Fitsum Tariku, Sara Hagos. Performance of green roof installed on highly insulated roof deck and the plants' effect: An experimental study // *Building and Environment*. 2022. Volume 221. 109337. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109337>

27. Agnieszka Bus, Anna Szelałowska. Green Water from Green Roofs – The Ecological and Economic Effects // Sustainability. 2021. Vol. 13(4). 2403. <https://doi.org/10.3390/su13042403>
28. Zhang Z., Szota C., Fletcher T., Williams N., Farrell C. Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance // J Environ Management. 2019. 232:404–412. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.070>
29. Alicja Kolasa-Więcek, Dariusz Suszanowicz. The green roofs for reduction in the load on rainwater drainage in highly urbanised areas // Environmental Science and Pollution Research. 2021. 28:34269–34277. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12616-3>
30. Kaiser D., Köhler M., Schmidt M., Wolff F. Increasing evapotranspiration on extensive green roofs by changing substrate depths, construction, and additional irrigation // Buildings. 2019. 9:173. <https://doi.org/10.3390/buildings9070173>
31. Cipolla S.S., Altobelli M., Maglionico M. Decentralized Water Management: Rainwater Harvesting, Greywater Reuse and Green Roofs within the GST4Water Project // Proceedings. 2018. Vol. 2. P. 673–680. DOI:10.3390/proceedings2110673
32. Tkachenko T. The reuse of rainwater drains by using «green roofs» // USEFUL online journal. Discipline: Water Supply & Treatment. 2019. Volume 3, Issue 1. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/631224.pdf>
33. Ткаченко Т.М., Прокопенко І.О. Розрахунок утриманого поверхневого стоку покрівлю німецького виробника // Екологічна безпека та природокористування, 2020. № 3 (35). С. 44–56. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.44-56>
34. Velasco-Munoz J.F., Aznar-Sanchez J.A., Batiles-de la Fuente A., Fidelibus M.D. Rainwater harvesting for agricultural irrigation: An analysis of global research // Water. 2019. Vol. 11. 1320. <https://doi.org/10.3390/w11071320>
35. Nandan Shetty, Mark Wang, Robert Elliott, Patricia Culligan. Examining How a Smart Rainwater Harvesting System Connected to a Green Roof Can Improve Urban Stormwater Management // Water. 2022. Vol. 14(14). 2216. <https://doi.org/10.3390/w14142216>
36. Thomas Schatzmayr Welp Sa, Mohammad K. Najjar, Ahmed W. A. Hammad, Elaine Vazquez, Assed Haddad. Assessing rainwater quality treated via a green roof system // Clean Technologies and Environmental Policy. 2022. Volume 24. P. 645–660. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02144-6>
37. Irga P.J., Braun J.T., Douglas A.N.J., Pettit T., Fujiwara S., Burchett M.D., Torpy F.R. The distribution of green walls and green roofs throughout Australia: Do policy instruments influence the frequency of projects? // Urban Forestry & Urban Greening. 2017. Volume 24. P. 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.0264>
38. Jing Dong, Jin Zuo, Jiancheng Luo. Development of a Management Framework for Applying Green Roof Policy in Urban China: A Preliminary Study // Sustainability. 2020. Vol. 12(24). 10364. <https://doi.org/10.3390/su122410364>
39. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs; Landscape Development and Landscaping Research Society e.v. (FLL): Bonn, Germany. 2018. URL: <https://bit.ly/3QCoLzG>
40. Xi Chen, Chenyang Shuai, Zhenhao Chen, Yu Zhang. What are the root causes hindering the implementation of green roofs in urban China? // Science of The Total Environment. 2019. Volume 654. P. 742–750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.051>
41. Maya S., Steven W.P., Jeff. J. Green Roof and Wall Policy in North America-Regulations, Incentives, and Best Practices. 2019. Available online: <https://greenroofs.org/policy-resources> (дата звернення: 08.03.2023).
42. Ткаченко Т.М. Науково-методологічні основи підвищення рівня екологічної безпеки урбоценозів шляхом створення енергоефективних технологій «зеленого» будівництва : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Ткаченко Т.М.; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. Київ, 2018. 311 с.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 09.06.2023

REFERENCES

1. Hlushchenko, R. O., Tkachenko, T. M., & Mileikovskiy, V. O. (2021). Effective drainage of rainwater from roads by rain garden-strips in the concept of the city-sponge. *Environmental Safety and Natural Resources*, 40(4), 46–59. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.46-59>
2. Mohammad A. Alim, Ataur Rahman, Zhong Tao, Brad Garner, Robert Griffith, Mark Liebman. (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*. Volume 362. 132561. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132561>
3. Tkachenko T.M. (2018). Problems of classification and use of "green constructions" in greening of modern cities. *Ecological sciences: scientific and practical journal*. No. 1(20). T.2. P. 21-24.
4. Tkachenko T.M. (2018). Problems of classification and use of "green constructions" in greening of modern cities. *III International scientific-practical congress: "Urban environment - XXI century"*. P. 50-52.
5. Florence Rezende Leite, Maria Lúcia Pereira Antunes. (2023). Green roof recent designs to runoff control: A review of building materials and plant species used in studies. *Ecological Engineering*. Volume 189. 106924. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106924>
6. Mohammad A. Alim. (2023). Experimental investigation of a multilayer detention roof for stormwater management. *Journal of Cleaner Production*. Volume 395. 136413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136413>
7. Jing Yan, Shouhong Zhang, Jianjun Zhang. (2022). Stormwater retention performance of green roofs with various configurations in different climatic zones. *Journal of Environmental Management*. Volume 319. 115447. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115447>
8. Dorin Maier. (2022). Perspective of using green walls to achieve better energy efficiency levels. A bibliometric review of the literature. *Energy and Buildings*. Volume 264. 112070. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112070>
9. Elmira Jameia. (2021). Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of The Total Environment*. Volume 791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721034781>
10. Mohammad Reza Seyedabadi, Mohsen Karrabi, Jafar Nabati. (2022). Investigating green roofs' CO₂ sequestration with cold- and drought-tolerant plants (a short- and long-term carbon footprint view). *Environmental Science and Pollution Research*. Volume 29. P. 14121–14130. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16750-w>
11. Victor G. Pessoa, Cristiane Guiselini, Abelardo A. de A. Montenegro, Heliton Pandorfi, José A. D. Barbosa Filho, Thais F. da S. Vicente. (2022). Carbon sequestration by plant species used in green roofs across different periods. *Rev. bras. eng. agric. ambient*. Volume 26 (6). <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n6p407-411>
12. Wooster E.I.F., Fleck R., Torpy F., Ramp D., Irga P.J. (2022). Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study. *Building and Environment*. Volume 207, Part A. 108458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108458>
13. Jiawei Fu, Karine Dupre, Silvia Tavares, David King, Zsuzsa Banhalmi-Zakar. (2022). Optimized greenery configuration to mitigate urban heat: A decade systematic review. *Frontiers of Architectural Research*. Volume 11, Issue 3. P. 466-491. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.12.005>
14. Wen Liu, Qi Feng, Weiping Chen, Wei Wei, Ravinesh C. Deo. (2019). The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments. *Journal of Hydrology*. Volume 569. P. 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.066>
15. Agnieszka Szpak, Joanna Modrzyńska, Joanna Piechowiak. (2022). Resilience of Polish cities and their rainwater management policies. *Urban Climate*. Volume 44. 101228. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101228>

16. Gilbert Osayemwenre, Otolorin Adelaja Osibote. (2021). A Review of Health Hazards Associated with Rainwater Harvested from Green, Conventional and Photovoltaic Rooftops. *International Journal of Environmental Science and Development*. Vol. 12, No. 10. e7e6639410ac4d63ba8569f7e40cda02550c.pdf (semanticscholar.org)
17. Sylvana Melo dos Santos, Érika Pinto Marinho, Glenda Cordeiro de Oliveira Lima, Everton Santos de Barros, Yan Ranny Machado Gomes. (2022). Green roof drained rainwater quality assessment: a physicochemical analysis from a case study in Northeastern Brazil. *Sustainable Water Resources Management*. Volume 8. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-022-00698-x>
18. Procaccini G., Monticelli C. (2021). A Green Roof Case Study in the Urban Context of Milan: Integrating the Residential and Cultivation Functions for Sustainable Development. *Water*. Vol. 13(2), 137. <https://doi.org/10.3390/w13020137>
19. Baryła A., Karczmarczyk A., Bus A. (2018). Role of substrates used for green roofs in limiting rainwater runoff. *Journal of Ecological Engineering*. 19(5):86-92. <https://doi.org/10.12911/22998993/91268>
20. Mentens J., Raes D., Hermy M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*. Volume 77. Issue 3. P. 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
21. Haowen Xie, Jun Liu, Mark Randall. (2022). Impact of structural factors on green roof runoff – A field investigation and statistical analysis. *Journal of Hydrology*. Volume 613, Part A. 128345. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128345>
22. Stovin V., Poč S., Berretta C. (2013). A modelling study of long term green roof retention performance. *Journal of Environmental Management*. Volume 131. P. 206-215. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.026>
23. Ju Young Lee, Min Jung Lee, Mooyoung Han. (2015). A pilot study to evaluate runoff quantity from green roofs. *Journal of Environmental Management*. Volume 152. P. 171-176. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.028>
24. Yongwei Gong, Dingkun Yin, Junqi Li et al. (2019). Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments. *Science of The Total Environment*. Volume 687. P. 505-515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.100>
25. Wen Liu, Bernard A. Engel, Qi Feng, Ruolin Li. (2022). Simulating annual runoff retention performance of extensive green roofs: A comparison of four climatic regions in China. *Journal of Hydrology*. Volume 610. 127871. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127871>
26. Fitsum Tariku, Sara Hagos. (2022). Performance of green roof installed on highly insulated roof deck and the plants' effect: An experimental study. *Building and Environment*. Volume 221. 109337. <https://doi.org/10.1016/j.buide.2022.109337>
27. Agnieszka Bus, Anna Szelągowska. (2021). Green Water from Green Roofs - The Ecological and Economic Effects. *Sustainability*. Vol. 13(4). 2403. <https://doi.org/10.3390/su13042403>
28. Zhang Z., Szota C., Fletcher T., Williams N., Farrell C. (2019). Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance. *J. Environ Management*. 232:404–412. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.070>
29. Alicja Kolasa-Więcek, Dariusz Suszanowicz. (2021). The green roofs for reduction in the load on rainwater drainage in highly urbanised areas. *Environmental Science and Pollution Research*. 28:34269–34277. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12616-3>
30. Kaiser D., Köhler M., Schmidt M., Wolff F. (2019). Increasing evapotranspiration on extensive green roofs by changing substrate depths, construction, and additional irrigation. *Buildings*. 9:173. <https://doi.org/10.3390/buildings9070173>
31. Cipolla S.S., Altobelli M., Maglionico M. (2018). Decentralized Water Management: Rainwater Harvesting, Greywater Reuse and Green Roofs within the GST4Water Project. *Proceedings*. Vol. 2. P. 673-680. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110673>
32. Tkachenko Tatiana. (2019). The reuse of rainwater drains by using «green roofs». *USEFUL online journal. Discipline: Water Supply & Treatment*. Volume 3, Issue 1. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/631224.pdf>

33. Tkachenko T.M., Prokopenko I.O. (2020). Calculation of retained surface runoff by the roof of a German manufacturer. *Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya*. No. 3 (35), P. 44–56. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.44-56> [in Ukrainian].
34. Velasco-Munoz J.F., Aznar-Sanchez J.A., Batiles-de-laFuente A., Fidelibus M.D. (2019). Rainwater harvesting for agricultural irrigation: An analysis of global research. *Water*. Vol. 11. 1320. <https://doi.org/10.3390/w11071320>
35. Nandan Shetty, Mark Wang, Robert Elliott, Patricia Culligan. (2022). Examining How a Smart Rainwater Harvesting System Connected to a Green Roof Can Improve Urban Stormwater Management. *Water*. Vol. 14(14). 2216. <https://doi.org/10.3390/w14142216>
36. Thomas Schatzmayr Welp Sa, Mohammad K. Najjar, Ahmed W. A. Hammad, Elaine Vazquez, Assed Haddad. (2022). Assessing rainwater quality treated via a green roof system. *Clean Technologies and Environmental Policy*. Volume 24. P. 645–660. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02144-6>
37. Irga P.J., Braun J.T., Douglas A.N.J., Pettit T., Fujiwara S., Burchett M.D., Torpy F.R. (2017). The distribution of green walls and green roofs throughout Australia: Do policy instruments influence the frequency of projects? *Urban Forestry & Urban Greening*. Volume 24. P. 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.0264>
38. Jing Dong, Jin Zuo, Jiancheng Luo. (2020). Development of a Management Framework for Applying Green Roof Policy in Urban China: A Preliminary Study. *Sustainability*. Vol. 12(24). 10364. <https://doi.org/10.3390/su122410364>
39. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs; Landscape Development and Landscaping Research Society e.v. (FLL): Bonn, Germany. 2018. Retrieved from: <https://bit.ly/3QCoLzG>
40. Xi Chen, Chenyang Shuai, Zhenhao Chen, Yu Zhang. (2019). What are the root causes hindering the implementation of green roofs in urban China? *Science of The Total Environment*. Volume 654. P. 742-750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.051>
41. Maya S., Steven W.P., Jeff. J. (2019). Green Roof and Wall Policy in North America-Regulations, Incentives, and Best Practices. Retrieved March, 8, 2023 from: <https://greenroofs.org/policy-resources>.
42. Tkachenko, T. M. (2018). Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyshchennia rivnia ekolohichnoi bezpeky urbotsenoziv shliakhom stvorennia enerhoefektyvnykh tekhnolohii «zelenoho» budivnytstva. dys. ... d-ra tekhn. Nauk. Kyiv: Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury [in Ukrainian].

The article was received 22.03.2023 and was accepted after revision 09.06.2023

Ткаченко Тетяна Миколаївна

д.т.н., професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

Мілейковський Віктор Олександрович

д.т.н., професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: 0000-0001-8543-1800 **e-mail:** v_mil@ukr.net

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 Повітрофлотський, 31

ORCID ID: 0000-0003-0428-6440 **e-mail:** marina-diek@ukr.net

УДК 504.064

Petro Kyriienko, PhD (Tech.sc), docent of Ecology Technogenic Safety
e-mail: p.kirienko@khai.edu

Oleksandr Betin, Dr, Professor of Ecology Technogenic Safety
e-mail: o.betin@khai.edu

Mykola Zakharchenko, PhD (Chemistry), docent of Ecology Technogenic Safety
e-mail: m.zakharchenko@khai.edu

Serhii Lobov, PhD (Tech.sc), docent of Ecology Technogenic Safety
ORCID ID 0000-0002-5849-749X *e-mail*: s.lobov@khai.edu

Katerina Msallam, PhD (Tech.sc), docent of Graphic Geometry and Computer Modelling
e-mail: k.msallam@khai.edu

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine

RESEARCH OF TECHNOLOGIES FOR THE EXTRACTION OF HEAVY METALS FROM INDUSTRIAL WASTEWATER

Abstract. *The presence of heavy metals in the environment is mainly associated with anthropogenic human activity. These are ferrous and non-ferrous metallurgy, heavy industry, energy. Due to air pollution, heavy metals enter the soil and water. The first place among the polluters of the environment with heavy metals is electroplating industry, where two categories of effluents are formed: spent concentrated effluent and diluted washing waters. In reservoirs, heavy metals have the ability to accumulate in the bottom sediments and thus are a source of second air pollution. They are not capable of biodegradation, but are able to accumulate in system components, causing a toxic effect on the animal world, humans and microorganisms. Different heavy metals affect the environment and biota in different ways. They can cause malfunction of the kidneys, liver, pancreas, accumulate in various organs and bones, causing their dysfunction. The greatest danger is heavy metals – chromium, nickel, cadmium, zinc. Their persistence, toxicity, ability to bioaccumulate and migrate through trophic chains pose a danger to the existence of hydrobionts, animals and, above all, human health. The authors offer technologies for cleaning wastewater from heavy metals: reagent technologies, bacterial purification technologies, as well as phytotechnologies. Proposed sewage treatment plants for the removal of heavy metals from wastewater. The pollution of surface water sources, human health and living organisms will depend on the reliable extraction of heavy metals from spent galvanic effluents.*

Keywords: *treatment facilities; heavy metals; galvanic drains; technology reagents; bacterial cleaning technologies; phytotechnology; wastewater treatment scheme.*

П.Г. Кирієнко, О.В. Бетін, М.І. Захарченко, С.О. Лобов, К. Мсаллам

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИЛУЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ІЗ ПРОМИСЛОВИХ СТИЧНИХ ВОД

***Анотація.** Наявність важких металів в навколишньому середовищі головним чином пов'язана з антропогенною діяльністю людини. Це чорна і кольорова металургія, важка промисловість, енергетика. Через забруднення повітря важкі метали попадають в ґрунт і воду. Перше місце серед забруднювачів навколишнього середовища важкими металами посідають гальванічні виробництва, де утворюються дві категорії стоків: відпрацьовані концентровані стоки та розведені промивні води. У водоймах важкі метали мають здатність накопичуватись у донних відкладах і тим самим є джерелом вторинного забруднення. Вони не здатні до біорозкладання, але здатні накопичуватись в компонентах систем, спричиняючи токсичну дію на тваринний світ, людину та мікроорганізми. Різні важкі метали по-різному впливають на навколишнє середовище і біоту. Вони можуть порушувати функціонування нирок, печінки, підшлункової залози, накопичуватись в різних органах і кістках, спричиняючи їх дисфункцію. Найбільшу небезпеку становлять важкі метали – хром, нікель, кадмій, цинк. Їхня стійкість, токсичність, здатність до біоаккумуляції та міграції по трофічних ланцюгах створює небезпеку для існування гідробіонтів, тварин та насамперед здоров'я людини. Автори пропонують технології очищення стічних вод від важких металів: реагентні технології, технології бактеріального очищення, а також фітотехнології. Запропоновані очисні споруди вилучення із стічних вод важких металів. Від надійного вилучення важких металів із відпрацьованих гальванічних стоків буде залежати забруднення поверхневих джерел вод, здоров'я людей і живих організмів.*

***Ключові слова:** очисні споруди; важкі метали; гальванічні стоки; реагентні технології; технології бактеріального очищення; фітотехнології; схема очищення стічних вод.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.54-65>

Постановка проблеми

Важкі метали (ВМ) в навколишнє середовище потрапляють двома шляхами. Перший – це природні аномалії, а другий – це антропогенний вплив промислового виробництва. Природні аномалії можуть вплинути на навколишнє середовище точково, а промислове забруднення – на дуже великі території атмосфери, літосфери і гідросфери. Всі міри середовища нерозривно зв'язані між собою.

ВМ – це група елементів з фізико-хімічними властивостями, які мають відносно високу щільність – понад 8 г/см³ та атомну масу більше ніж 50 г/моль (окрім благородних та рідкісних металів). До ВМ відносяться понад 40 металів періодичної системи Д.І. Менделєєва, серед яких, наприклад, Zn (цинк), Cr (хром), Ni (нікель), Cd (кадмій). Цинк – метал сріблясто-блакитного кольору. Цинкові покриття широко застосовують для захисту металів від корозії. Хром – метал блакитно-білого кольору з високою твердістю. Його

використовують для нанесення захисних покриттів, захисту від корозії, а також в металургії та хімічній промисловості. Кадмій – сріблясто-білий метал з синюватим відливом. Використовується для нанесення захисних покриттів на деталі конструкційних матеріалів кріплення оздоблення, а також в хімічній промисловості. Нікель – метал сріблясто-білого кольору. Характеризується високою корозійною стійкістю. Використовується для виробництва нержавіючої сталі, нанесення гальванічних покриттів, у хімічній промисловості.

Наявність ВМ в навколишньому середовищі головним чином пов'язана з антропогенною діяльністю людини. Це чорна і кольорова металургія, важка промисловість, енергетика, вихлопні гази двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Через забруднення повітря ВМ попадають в ґрунт і воду.

При попаданні ВМ в ґрунт, підземні і поверхневі води іони ВМ включаються до харчових ланцюгів, де відбувається їх подальше перетворення та нітрування.

Перше місце серед забруднювачів навколишнього середовища ВМ належить гальванічним виробництвам. При одержанні 1 м² покриттів у відходи могли попадати 0,2–2 грами металу [1]. В результаті нанесення покриттів утворюються дві категорії стоків: відпрацьовані концентровані стоки та розведені проливні води. Для промивання деталі необхідні значні обсяги води, тому вони є головним джерелом надходження ВМ в стічні води.

У водоймах ВМ мають здатність накопичуватися у донних відкладах і тим самим є джерелом вторинного забруднення. Вони не здатні до біорозкладання, але здатні накопичуватись (акумулюватись) в компонентах екосистем, спричиняючи токсичну дію на живі організми тваринного світу і людину, порушувати рівновагу екосистем.

Актуальність

Вивчення надходження в атмосферу, літосферу і гідросферу, розподілення ВМ у навколишньому середовищі, концентрації, а також перелік ВМ є предметом дослідження і актуальним завданням дослідження технології очищення стічних вод.

Не всі ВМ однаковою мірою впливають на середовище, в яке вони потрапляють, завдяки їх різній концентрації в воді, а також розповсюдженню в середовищі. Всі ВМ є деструктивними для води, а через неї мають негативні впливи на організми людей, тварин і гідробіонтів, рослини та мікроорганізми.

Виявити якісний і кількісний склад ВМ в конкретних організмах і середовищах – важкий та дорогий процес. Аналіз на наявність в людському організмі ВМ коштує, наприклад, в лабораторіях Сінево (Synevo) м. Харків: кадмій – 980 грн, хром – 1020 грн, цинк – 320 грн, свинець – 920 грн, ртуть – 720 грн, мідь – 210 грн [12].

ВМ по-різному впливають на живі організми навколишнього середовища. Вони можуть спричинити порушення функціонування нирок, печінки, підшлункової залози, накопичуватись в різних органах і кістках, призводячи до їх дисфункції. Можуть витіснити з організму корисні елементи кальцій та магній, призводити до таких захворювань, як рак, хвороби серцево-судинної, нервової систем, порушення обміну речовин [11].

Друга проблема – це очищення викидів в гідросферу, атмосферу, літосферу від ВМ. Для вирішення цієї проблеми постає два завдання: недопущення

попадання ВМ у воду і саме очищення стічної води. Для виконання першого завдання необхідно забезпечити надійними очисними спорудами, які очистять викиди в навколишнє середовище від ВМ.

Стічні води промислових підприємств, особливо гальванічних цехів, у своєму складі містять найбільш широкую різноманітність неорганічних токсичних домішок. Серед них найбільшу небезпеку становлять ВМ – хром, нікель, кадмій, цинк. Їхня стійкість, токсичність, здатність до біоаккумуляції та міграція по природним харчовим ланцюгам створює небезпеку для існування гідробіотів, рослин, тварин та насамперед для здоров'я людини. Тому проблема очищення промислових стічних вод від ВМ є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як зазначено вище, ВМ в навколишнє середовище потрапляють в основному через антропогенний вплив. Вода забруднюється через недостатнє або відсутнє очищення у виробничих стічних водах. На кожному підприємстві, що в технологічному процесі використовує воду, повинні бути очисні споруди, які і забезпечують вилучення ВМ з відпрацьованої води. Також не проходять очищення від нафтопродуктів і ВМ і зливові води. Побутові стічні води очищуються саме від органічних сполук, але не очищуються від нафтопродуктів і ВМ.

Таким чином, ВМ потрапляють у водні об'єкти (річки, озера, моря та інш.) через те, що вода не очищується, або через те, що немає ефективних технологічних процесів очищення каналізаційних стічних вод. В ґрунт ВМ зазвичай попадають через атмосферні опади.

Очищення стічних вод промислових підприємств від ВМ передбачено Директивою Європейського Парламенту та Ради [5], Законом України «Про основні засади державної екологічної політики України на період до 2030 року» [6]. Очищення стічних вод може відбуватися різними технологічними методами: реагентним, електрохімічним, мембранним, іонообмінним, комбінованим з видалення ВМ та нафтопродуктів [7, 8].

Комбіноване очищення можливе з використанням реагентних технологій, технологій «Фітотенк» [10] з використанням вищих водних рослин (лепеха болотна, очерет, рогаза, череда, водяний перець), а також із застосуванням анаеробних бактерій [9]. Процеси бактеріального очищення води від екологічно та фізіологічно небезпечних іонів ВМ. в тому числі і шестивалентного хрому, простіші, дешевші, екологічніші за аналогічні фізико-хімічні процеси. Мікробні сульфат- і хромат-деструкція не потребують реагентів і енергетичних експлуатаційних затрат, внаслідок їхнього перебігу утворюються компактні осади не розчинних у воді сполук ВМ, а тому мають велику перспективу [11].

Мета роботи

- 1) Дослідження технологій очищення води від ВМ
 - використання реагентних технологій;
 - використання фітотехнологій в очищенні стічних вод від ВМ;
 - використання технологій бактеріального очищення.
- 2) Створення схем очисних споруд для очищення стічних вод від ВМ.

Виклад основного матеріалу

У стічні води ВМ попадають після покриття електrolітичним методом з електrolітів солей важких металів – цинку, кадмію, нікелю і хрому. На повноту осадження впливають фізичні (розмір часточок осадів, сольовий ефект, природа електrolіту та інш.) і хімічні (рН середовища, наявність спільних іонів, комплексоутворювачів) чинники. В найпростіших випадках за відсутності комплексоутворювачів або надлишку спільних іонів можна стверджувати, що осадження ВМ повинно відбуватися відповідно до ряду розчинності їх осадів-гідроксидів або карбонатів.

Для реагентного методу вилучення ВМ із стічних вод використовували наступні реактиви: оксид кальцію CaO, гідроксид кальцію Ca(OH)₂, їдкий натрій NaOH, карбонат натрію Na₂CO₃. В якості ВМ в стічних водах будемо досліджувати: кадмій Cd, цинк Zn, нікель Ni, хром Cr (в іонній формі).

Хімічні реакції ВМ в стічних водах і реагентів в іонному виді будуть наступними:

1. Реагент Ca(OH)₂.

а) дисоціює в воді (сильний електrolіт)



б) іони важких металів реагують з гідроксид-іонами за наступними реакціями:



Всі гідроксиди металів випадають в осад. Добуток розчинності (ДР) цих речовин наведений в таблиці 1.

Таблиця 1. Добуток розчинності гідроксидів металів при 25⁰С

Гідроксид металу	ДР
Zn(OH) ₂	4,9·10 ⁻¹⁷
Cd(OH) ₂	1,8·10 ⁻¹⁴
Ni(OH) ₂	1,2·10 ⁻¹⁶
Cr(OH) ₃	4,0·10 ⁻¹⁵
Ca(OH) ₂	6,1·10 ⁻⁶

Із таблиці 1 видно, що у воді вказані іони в лужному середовищі (реагент Ca(OH)₂) зв'язуються з гідроксид-іонами та випадають в осад. Чим менше значення ДР, тим гірша розчинність гідроксиду металу у воді. Найменша розчинність у воді у Zn(OH)₂, а найбільша – у Cd(OH)₂. Але і Cd(OH)₂ випадає в осад. Розчинність Ni(OH)₂ і Cr(OH)₂ приблизно рівні, а осадки будуть стійкими. Відносно Ca(OH)₂, то ДР = 6,1·10⁻⁶, розчинність буде більша за розчинність інших гідроксид металів. Дисоціація цього реагенту дає достатню кількість іонів OH⁻, необхідних для протікання реакції (2–5).

Розраховані концентрації іонів металів та їх ГДК наведені в таблицях 2, 3.

Таблиця 2. Концентрація іонів металів в розчинах над сполуками

Сполука	Концентрація гідроксидів, моль/л	Концентрація іонів металів, г/л
Zn(OH) ₂	$2,31 \cdot 10^{-6}$	$2,43 \cdot 10^{-3}$
Cd(OH) ₂	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$
Ni(OH) ₂	$3,11 \cdot 10^{-6}$	$1,83 \cdot 10^{-4}$
Cr(OH) ₃	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$5,72 \cdot 10^{-3}$
Ca(OH) ₂	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$4,61 \cdot 10^{-1}$

Таблиця 3. Гранично допустимі концентрації (ГДК) іонів металів [15]

Іони металів	Вода питна, стандарт в мг/л		Природні води в річках зі скиданням промислових стічних вод
	ВОЗ	ЄС	
Zn ²⁺	3,0	0,1–5,0	0,05 мг/л
Cd ²⁺	0,003	0,005	0,05–1 мкг/л
Ni ²⁺	0,02	0,02	до 1 мг/л
Cr ⁶⁺	0,05	0,05	можуть досягати 0,1 мг/л
Ca ²⁺	не нормується	100	високий вміст Ca несприятливо впливає на серцево-судинну систему

Як показують розрахунки, концентрація іонів ВМ при використанні цього реагентного методу (з дотриманням стехіометрії реагентів) в реакціях (2–5) набагато менша, ніж їх ГДК за різними стандартами та в природних водах, в яких є скиди виробничих стічних вод. Гідроксид кальцію, як реагент, характеризується ДР у воді при 25⁰C рівним $6 \cdot 10^{-6}$ і концентрацією іонів Ca²⁺ у воді рівній 100 мг/л для нормативу ЄС, що не перевищує значення максимально допустимої концентрації кальцію для питної води та природних вод зі скиданням промислових стічних вод.

Таким чином, показана ефективність використання реагентного методу очищення стічних вод від іонів ВМ (Zn²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺, Cr³⁺) сполукою гідроксиду кальцію.

Дослідження використання технологій бактеріального очищення стічних вод від важких металів

В 1964 р. Н. Путиліна із співробітниками опублікували роботу «Микробний метод обесфеноливання сточних вод», в якій запропонували спеціальні селекційовані мікроорганізми для очищення стічних вод з іонами ВМ. Під час очищення гальванічних та інших промислових стічних вод від іонів ВМ деякі бактерії використовують сульфати як окисники органічних сполук. За анаеробних умов внаслідок перебігу цього біологічного процесу утворюється водень сульфур, який вступає в хімічну реакцію з іонами ВМ, перетворюючи їх в практично не розчинні у воді сульфіді, які відділяються від води, що очищують, звичайним відстоюванням.

Існує проблема утримання окремих штамів бактерій в очисних спорудах при очищенні стічної води. Їх практично неможливо затримати в активному мулі або іммобілізувати ці бактерії на нерозчинних у воді насадках. Такими насадками можуть бути тканини, полотна, пластини й інші волокнисті речовини. Їх необхідно розвішувати у стічній воді. До цих насадок будуть прилипати і бактерії завдяки адгезії та іншим хімічним і фізичним процесам – це регулярні насадки. Як регулярні насадки можна використовувати кореневу систему. Серед нерегулярних насадок або тих, що рухаються у стічній воді, можуть бути пісок, активоване вугілля та інші.

Облаштування анаеробної стадії на початку процесу очищення стічної води прискорює цей процес, забезпечує вилучення з води ВМ, утворення енергетично багатих газів – метану, водню – істотно зменшує експлуатаційні затрати на очищення води.

Вміст ВМ в рідкій фракції заброджених відходів у надмуловій воді дуже незначний, що спричинено осадженням ВМ у формі твердої фракції нерозчинних сульфідів. Обробка осадів дозволяє видалити з надмулової води: нікель – 89,6%, цинк – 89%, хром загальний (тривалентний та шестивалентний), кадмій – 86%. При цьому під час збруднення суміші відходів з рідкої фракції видалені органічні забруднення. Отже, рідка фракція не потребує доочищення.

Дослідження фітотехнології в очищенні стічних вод від важких металів

Людством давно було помічено, що на болотистих екосистемах, де ростуть лепеха (аір болотний), рогоз, очерет, комиш та інші вищі водні рослини в невеликих ярах, можна було набрати воду, придатну для питного споживання, приємного смаку. Українським науково-дослідним інститутом екологічних проблем (УкрНДЦЕП) м. Харкова було проведено дослідження використання фітотехнологій в очищенні стічних вод (шахтних вод, зливого стоку), а також в підготовці питної води. Там же були запропоновані технологічні схеми з використанням фітотехнології для очищення і підготовки питної води [10].

Нами була запропонована фітотехнологічна схема з використанням вищих водяних рослин – рогозу, лепехи (аір болотний), комишу, водяного перцю, череди, очерету – в поєднанні з використанням біофільтрів. Коренева система вищих рослин проникає в завантаження біофільтра, збільшує площу контакту із забрудненою водою і може її очистити, в тому числі і від ВМ.

Обговорення результатів

Для впровадження технології очищення стічних вод від ВМ необхідно створити схему, де в одній схемі об'єднати всі 3 напрямки очищення стічних вод від ВМ: реагентний метод, фітотехнології, технології бактеріального очищення. На рис. 1 зображена блок-схема очищення стічних вод від ВМ.

Блок-схема працює наступним чином: стічна вода 1 подається в блок механічного очищення 2. В ньому стічна вода очищається від механічних домішок, які через спеціальний пристрій 3 видаляються на утилізацію. Далі

вода через трубопровід 4 попадає в блок реагентного очищення 5. В блоці 5 і відбуваються хімічні реакції на іонному рівні в залежності від того, які реагенти будуть приготовлені в блоці 6 та які забруднювачі будуть в стічній воді. Осад іонних хімічних реакцій 7 спеціальними пристроями буде видалятися в пристрій зневоднення 8, а зневоднений осад буде утилізуватися в пристрої 9. Вода, яка очистилася в блоці реагентного очищення 5, буде надходити через трубопровід 11 подачі води на доочищення в фітомеліоративний блок 12. Через відкритий кран 10 на трубопроводі 11 стічна вода може одночасно надходити в блок 13 бактеріального очищення. Очищена вода в блоці 5 та доочищена в блоках 12 і 13 надходить через трубопровід 14 на повторне використання або в поверхневе джерело води.

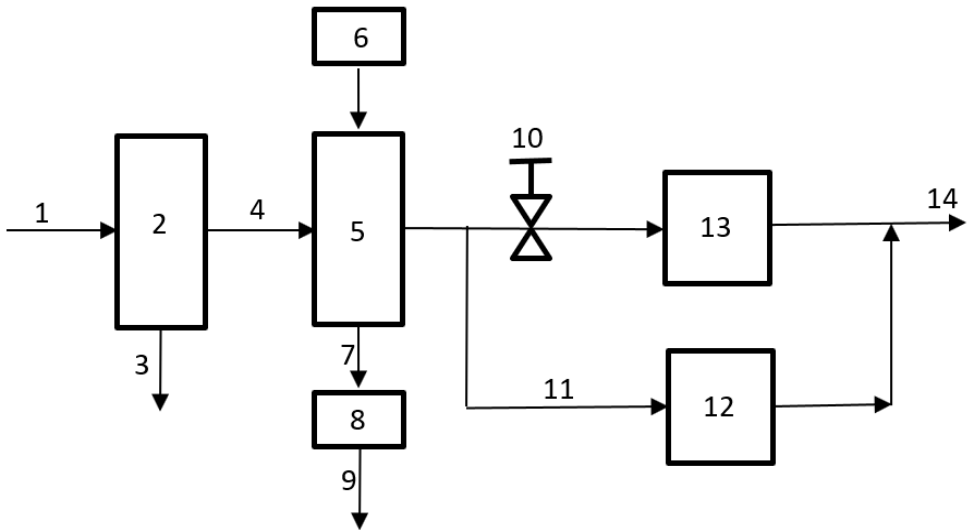


Рис. 1. Блок-схема очищення стічних вод від важких металів:

1 – стічна вода, 2 – блок механічного очищення, 3 – видалення механічних домішок, 4 – трубопровід, 5 – блок реагентного очищення, 6 – блок приготування реагентів, 7 – осад, 8 – зневоднення осаду, 9 – утилізація осаду, 10 – розподільчий кран, 11 – вода на очищення, 12 – фітомеліоративний блок, 13 – бактеріальне очищення, 14 – очищена вода

Реагентна схема видалення ВМ із стічних вод зображена на рис. 2.

Технологічна схема видалення ВМ реагентним методом працює наступним чином. Очисна споруда 1 розташована в землі для самопливного надходження стічної води, обладнана гідроізоляцією. Очисна споруда обладнана трубопроводами 3 для подачі реагентів. Реагенти через розподільні перфоровані трубопроводи 4, що розташовані в очисній споруді, змішуються зі стічною водою 5, надходять в завантаження 6, де відбувається реакція. Осад 7 з хімічної реакції осаджується в заглибленні, звідки відпомповується спеціальним пристроєм на утилізацію. Стічна вода з очищення 8 через трубопровід надходить на доочищення.

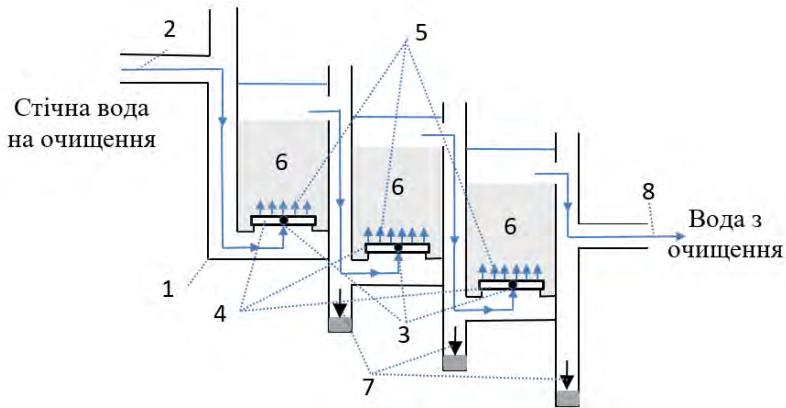


Рис. 2. Технологічна схема видалення важких металів із стічних вод реагентним методом:

1 – очисна споруда з гідроізоляцією, 2 – стічна вода, 3 – трубопроводи для подачі реагентів, 4 – розподільні перфоровані трубопроводи, 5 – стічні води, змішані з реагентами, 6 – завантаження (в якості завантаження може використовуватись щебінь, керамзит або інші матеріали), 7 – осад, 8 – вода з очищення

На рис. 3 зображено фітотехнологічний блок очищення стічних вод від ВМ.

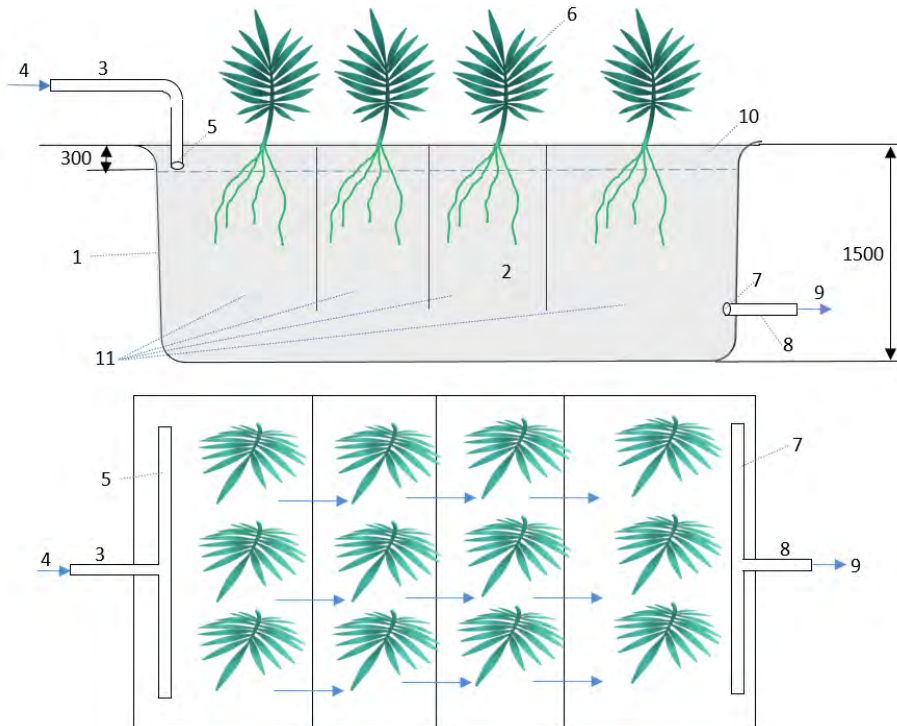


Рис. 3. Фітотехнологічний блок очищення стічних вод від ВМ:

1 – гідроізоляція, 2 – завантаження (гравій й керамзит), 3 – трубопровід для подачі стічної води, 4 – стічна вода, 5 – розподільчий перфорований трубопровід, 6 – рослинність (рогіз, лепеха (air), комиш, череда, очерет та ін.), 7 – перфорована труба, 8 – відвідний трубопровід, 9 – очищена стічна вода, 10 – коренева підстилка (суміш торфу з великозернистим піском), 11 – відсіки для окремих видів рослинності

Фітотехнологічний блок очищення стічних вод від ВМ працює наступним чином. Очисна споруда розташована в землі, гідроізольована, і стічна вода самопливно проходить через очисну споруду за 2–3 години. Коріння рослин проростають в завантаження, і на них і біоплівці завантаження відбувається вилучення ВМ.

Стічна вода 4, через трубопровід подачі води 3, надходить в розподільчий перфорований трубопровід 5 і просочується в завантаження 2, розділене перфорованими перегородками на секції 11, в яких посаджені окремі види рослинності. Для кращого росту рослин над завантаженням розташовано шар із піску і торфу (як в природних умовах) 10 товщиною 300 мм. Вода проходить через коріння і завантаження і через перфоровану трубу 7 надходить у відвідний трубопровід 8, виводиться як очищена вода 9.

Висновки

1. Утилізація відпрацьованих електролітичних розчинів без вилучення ВМ неможлива.
2. Основним методом вилучення ВМ із стічних вод відпрацьованих електролітів є реагентний метод.
3. В якості допоміжних методів очищення стічних вод від ВМ можна використовувати технології бактеріального очищення та фітотехнології.
4. На кожному підприємстві, де використовуються технології електролітичного нанесення покриттів, необхідно облаштовувати очисні споруди очищення відпрацьованих електролітів від ВМ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Екологічна безпека гальванотехніки. Частина 1. Стічні води. Механічна та сорбційна очистка: навч. пос. / М.І. Данченко, С.В. Фроленкова – К.: НТУ “КПУ”. 2016–2020.
2. Кирієнко П.Г., Ключко Т.О., Хоменко І.Є., Дурневич Г.М. Дослідження міграції важких металів у рослинних відходах сільського господарства. *Екологічна безпека та природокористування*, 36(4), 32–40. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.32-40>.
3. Бичков С.А., Кирієнко П.Г., Варламов Є.М., Бетін О.В., Мірсултанова Л.Р. Реконструкція очисних споруд для очищення зливових вод на підприємстві ДП «Антонов». *Екологічна безпека та природокористування*, 37(1), 35–43. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.35-43>.
4. Кирієнко П.Г., Варламов Є.М., Бетін О.В., Бичков С.А., Мірсултанова Л.Р. Патент на винахід №120726 від 27.01.2021, біол. №2. Пристрій для очищення зливних вод від нафтопродуктів і завислих речовин.
5. Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 жовтня 2000 р. “Про встановлення рамок діяльності співтовариства у сфері водної політики”.
6. Закон України “Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року” від 28.02.2019 №2697 – VIII. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2018-17>.
7. Аналіз методів очищення стічних вод від іонів важких металів. Ціпух В.Я., Саблій Л.А. Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського.”
8. Черниш Є.Ю. Утилізація осадів стічних вод сульфідогенною асоціацією мікроорганізмів. Суми 2014 – 233 с.
9. Безцілий О.О. Відтворення відпрацьованих стічних вод, забруднених іонами важких металів. Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Україна.

10. Режим доступу: www.phytoremediation.com.ua
11. А.К. Запольський, Н.А. Мішкова-Клименко. І.М. Астрелін та ін. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: Підручник. – К.: Лібра. 2000 – 552 с.
12. Калькулятор вартості аналізів (Сінево – vitagramma)(spravochnik.synevo.ua).
13. Краткий справочник физико-химических величин. Издание 8-е, переработанное (Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой). – Л.: Химия, 1983 – 232 с.
14. Химическая энциклопедия: в 5 т.: т2: Изд. Даффа-Меди / Редкол.: Кнунянс И.П. и др. – М.: Сов. энцик.; 1990 – 671 с.
15. Запольський А.К. Водопостачання, водовідведення та якість води: Підручник. – К.: Вища шк., 2005. – 571 с.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2023 і прийнята до друку після рецензування 29.05.2023

REFERENCES

1. Danchenko, M.I., & Frolenkova, S.V. (2016–2020). Ecological safety of electroplating. Part 1. Wastewater. *Mechanical and sorption cleaning*: textbook. Kyiv: NTU "KPU" [in Ukrainian].
2. Kyrienko, P.G., Klocko, T.O., Khomenko, I.Y., & Durnevich, G.M. (2020). Analysis of heavy metal migration in vegetable agricultural waste. *Environmental Safety and Natural Resources*, 36(4), 32–40 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.32-40>
3. Bychkov, S.A., Kyriienko, P.G., Varlamov, Y.M., Betin, O.V., & Mirsultanova, L.R. (2021). Reconstruction of treatment facilities for wastewater treatment at Antonov State Enterprise. *Environmental Safety and Natural Resources*, 37(1), 35–43 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.35-43>
4. Kiriienko P.G., Varlamov Y.M., Betin O.V., Bychkov S.A., Mirsultanova L.R. Patent for invention No120726 dated 27.01.2021, biol. No2. *Device for cleaning drain water from petroleum products and suspended substances* [in Ukrainian].
5. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 "On establishing the framework for community activities in the field of water policy".
6. Law of Ukraine "On the basic principles (strategy) of the state environmental policy of Ukraine for the period up to 2030" of 28.02.2019 No2697 – VIII. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2018-17>
7. Tsipukh, V.Ya., & Sabliy, L.A. *Analysis of methods for wastewater treatment from heavy metal ions*. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" [in Ukrainian].
8. Chernysh, E.Y. (2014). *Utilization of sewage sludge by the sulfidogenic association of microorganisms*. Sumy [in Ukrainian].
9. Beztsiynyi, O.O. *Reproduction of wastewater contaminated with heavy metal ions*. Kharkiv National University of Urban Economy named O.M. Beketova, Ukraine [in Ukrainian].
10. Retrieved from: www.phytoremediation.com.ua
11. Zapolsky, A.K., Mishkova-Klimenko, N.A., Astrelin, I.M. at al. (2000). *Physico-chemical bases of wastewater treatment technology*: Textbook. Kyiv: Libra [in Ukrainian].
12. Calculator of the cost of analyzes (Synevo – vitagramma) (spravochnik.synevo.ua).
13. Ravdel, A.A., & Ponomareva, A.M. (Eds.). (1983). *A Brief Reference Book of Physical and Chemical Quantities* (8th ed., revised). Lviv: Chemistry [in Russian].
14. Knunyans I.P. et al. (Eds.). (1990). *Chemical Encyclopedia*: in 5 vol. (Vol. 2). Moscow: Sov. Entsik [in Russian].
15. Zapolsky, A.K. (2005). *Water supply, sanitation and water quality*: Textbook. Kyiv: Vyscha shkola [in Ukrainian].

The article was received 22.02.2023 and was accepted after revision 29.05.2023

Кирієнко Петро Григорович

кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Адреса робоча: 6170 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

e-mail: p.kirienko@khai.edu

Бетін Олександр Володимирович

доктор технічних наук, професор Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», лауреат Державної премії України

Адреса робоча: 6170 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

e-mail: o.betin@khai.edu

Захарченко Микола Іванович

кандидат хімічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Адреса робоча: 6170 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

e-mail: m.zakharchenko@khai.edu

Лобов Сергій Олександрович

кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Адреса робоча: 6170 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

ORCID ID 0000-0002-5849-749X **e-mail:** s.lobov@khai.edu

Мсаллам Катерина

кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Адреса робоча: 6170 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

e-mail: k.msallam@khai.edu

УДК 550.8: 622.8

Leonid Rudakov, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Water Engineering

ORCID ID: 0000-0001-7277-7220 *e-mail:* rudakov.l.m@dsau.dp.ua

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

ENVIRONMENTAL AND OPERATIONAL SAFETY OF TAILING STORAGE FACILITIES: ANALYSIS OF ACCIDENTS, CAUSES AND TECHNICAL STATE DIAGNOSTIC METHODS

***Abstract.** A number of high-profile industrial accidents occurred at sludge and tailings storage facilities in different countries of the world are considered. The problem of ecological and technogenic danger of operating such objects, which leads to significant casualties among the civilian population, serious economic losses and harms the surrounding natural environment, is illustrated. The main causes of emergency situations have been established and analysed, it will help to reduce the risk of accidents and to minimize negative environmental consequences for similar facilities in Ukraine. The retrospective review covers the period from 1960 to 2022. During this time, about 150 cases of soil dams' destruction in waste storage facilities were recorded. The different tendency in the frequency of accidents is noted. In particular, during the period from 1960 to 2009, there were 98 accidents with an average frequency of nearly two (1.98) per year. Over the last decade (2010-2020), the number of accidents reached 36 cases, and their frequency almost doubled to 3.6 accidents per year. Over the past two years, from the beginning of 2021 to December 2022, 10 accidents have already been registered. The vast majority of accidents during this period occurred in 34 countries of the world. The largest number of them was noted in the USA (22.4%), China (10.4%), Brazil (7.5%), Chile (6.7%), the Philippines (6.0%), Canada (5.2 %), Great Britain (4.5%) and other countries. Studies note jumps in the increase of accidents that have ten-year trends (1975, 1985, 1995, 2005). The general tendency of mass accidents since the beginning of 2015 is shown, which is substantiated by the expired terms of operation of many mining and ore enterprises (mines) and significant (exceeding normative) terms of operation of tailings storage facilities, which in some places were left without proper supervision and care. It was established that a violation of the dam slope stability (37%), an overflow of the designed capacity of the tailings storage facility (12%), seismic activity (11%), etc., are the main causes of accidents. A review of modern approaches to the management of dangerous anthropogenic objects and methods of diagnosing the technical condition of such structures was conducted. The use of a complex of organizational and technical solutions about the implementing the modern methods of assessment and control the technical condition of waste storage facilities at various levels of their operation and stages of the life cycle is proposed.*

***Key words:** tailings storage facility; anthropogenic accident; soil dam; mining industry waste; diagnostics of technical condition.*

Л.М. Рудаков

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

ЕКОЛОГІЧНА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНА БЕЗПЕКА ХВОСТОСХОВИЩ: АНАЛІЗ АВАРІЙ, ПРИЧИН ТА МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

***Анотація.** Розглянуто ряд резонансних промислових аварій, які сталися на шламо- та хвостосховищах різних країн світу. Показано проблему екологічної і техногенної небезпеки експлуатації таких об'єктів, що призводить до значних жертв серед цивільного населення, серйозних економічних збитків і завдає шкоди навколишньому природному середовищу. Встановлено та проаналізовано основні причини виникнення аварійних ситуацій, що дозволить зменшити ризик виникнення аварій та мінімізувати негативні екологічні наслідки для аналогічних об'єктів на території України. Ретроспективний огляд охоплює період з 1960 по 2022 роки. За цей час зафіксовані близько 150 випадків руйнування ґрунтових дамб накопичувачів відходів. Відмічається різна тенденція виникнення частоти аварій. Зокрема, у період з 1960 по 2009 рік трапилось 98 аварій з частотою в середньому майже дві (1,98) на рік. За останнє десятиріччя (2010–2020 рр.) кількість аварій досягла 36 випадків, а їх частота збільшилась майже удвічі – до 3,6 аварій на рік. За останні два роки, з початку 2021 по грудень 2022 року, вже зареєстровано 10 аварій. Переважна більшість аварій за цей період сталися в 34 країнах світу. Найбільша їх кількість відмічена в США (22,4 %), Китаї (10,4%), Бразилії (7,5%), Чилі (6,7%), Філіппінах (6,0%), Канаді (5,2%), Великій Британії (4,5%) та інших країнах. Дослідженнями відмічаються сплески збільшення аварій, які мають десятирічні тренди (1975 р., 1985 р., 1995 р., 2005 р.). Показана загальна тенденція масових аварій з початку 2015 року, що обґрунтовується вичерпними термінами роботи багатьох гірничо-рудних підприємств (копалень) та значними (понад нормативними) термінами експлуатації хвостосховищ, які подекуди залишилися без належного нагляду і догляду. Встановлено, що основними причинами аварій є порушення стійкості схилу дамби (37%), переповерхнення проєктної ємності хвостосховища (12%), сейсмічні прояви (11%) тощо. Проведено огляд сучасних підходів до управління техногенно-небезпечними об'єктами та методів діагностики технічного стану таких споруд. Запропоновано використання комплексу організаційних та технічних рішень щодо використання сучасних методів оцінювання та контролю за технічним станом накопичувачів відходів на різних рівнях їх експлуатації та стадіях життєвого циклу.*

***Ключові слова:** хвостосховище; техногенна аварія; ґрунтова дамба; відходи гірничодобувної промисловості; діагностика технічного стану.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.66-84>

Вступ

Видобуток корисних копалин та виробнича діяльність підприємств теплоенергетики, металургійної, хімічної та інших галузей промисловості спричиняють формування значної кількості відходів. За даними [1] близько 160 тисяч га території України вкриті промисловими відходами. Щорічно в Україні утворюється близько 8 млн тонн золошлакових відходів, а їх зберігання супроводжується низкою вкрай негативних наслідків для довкілля

та здоров'я людини. Обсяги вже накопичених відходів сягають майже 300 млн тонн. В той же час в Україні близько 300 виведених з експлуатації і нерекультивованих кар'єрів, а також мільйони гектарів площ шламо- та хвостосховищ [2, 3].

Надзвичайні ситуації на хвостосховищах, які накопичують великі обсяги відходів гірничодобувної промисловості, можуть призводити до забруднення навколишнього природного середовища. Вони являють серйозну загрозу для людей та довкілля, особливо у разі неналежного проектування, поводження з хвостами або управління цим господарством.

На підставі добре задокументованих випадків аварій, з досвіду світової та вітчизняної експлуатації, можна проаналізувати основні причини і фактори їх виникнення. Це обґрунтовує актуальність та дозволяє проводити дослідження з пошуку організаційно-технічних заходів та розробки нових підходів для підвищення рівня екологічної безпеки хвостосховищ.

Постановка проблеми

Із 344 наявних в Україні хвостосховищ усі, майже без виключення, збудовані із ґрунтових матеріалів. Тривала експлуатація і не завжди належний контроль знижують рівень екологічної безпеки навіть законсервованих і виведених із експлуатації хвостосховищ. При цьому деякі з них просто безвідповідально кинуті і несуть не меншу загрозу, ніж діючі.

Техногенні аварії на хвостосховищах продовжують відбуватися як у країнах, що розвиваються, так і в розвинених, що вимагає удосконалення, розробки та застосування нових підходів і методів до управління такими техногенними об'єктами [4, 5]. Руйнування конструкцій та аварії, хоч і рідкісні, але продовжують відбуватися з частотою, що перевищує очікування суспільства [6–8].

Питання утилізації відходів, недопущення їх міграції в навколишнє середовище та забезпечення екологічної безпеки на сьогоднішній день є надзвичайно актуальним [9]. Ознайомлення, вивчення та глибокий аналіз причин виникнення аварійних ситуацій на тих підприємствах, які мають технічні чи конструктивні недоліки, зазнали руйнувань і т.д., дозволить зменшити кількість та попередити наслідки масштабних аварій і катастроф у майбутньому [10]. З усієї сукупності світового реєстру дамб [11], тільки за даними «уранового проекту», який є частиною Всесвітньої інформаційної служби з енергетики [12] і веде облік та охоплює наслідки впливу видобутку урану та виробництва ядерного палива на здоров'я оточуючих та навколишнє середовище з 1960 року, налічується близько 150 аварій.

Таким чином, метою роботи було встановлення та аналіз основних причин виникнення аварійних ситуацій і пошук оптимальних методів та підходів для екологічно безпечного управління такими спорудами на території України.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) дослідити та проаналізувати відомі аварії у світі за останні роки;
- 2) встановити основні причини виникнення аварій;
- 3) оцінити сучасні підходи та методи діагностики технічного стану, системи управління та забезпечення екологічної безпеки під час експлуатації, закриття та рекультивації накопичувачів промислових відходів.

Методика досліджень

При узагальненні кількості і частоти виникнення аварій використано статистичні та аналітичні методи оцінки з обробкою у табличних редакторах. Для графічної інтерпретації отриманих результатів застосовано сучасні програмні засоби. Використання аналітичного підходу дозволило виявити і згрупувати причини і наслідки надзвичайних подій.

Результати досліджень

Ретроспективний огляд охоплює період з 1960 по 2022 роки. За цей час зафіксовані близько 150 випадків руйнування ґрунтових дамб накопичувачів відходів (рис. 1).

Відмічається різна тенденція виникнення частоти аварій. Зокрема, у період з 1960 по 2009 рік трапилось 98 аварій з частотою в середньому майже дві (1,98) на рік. За останнє десятиріччя (2010–2020 рр.) кількість аварій досягла 36 випадків, а їх частота збільшилась майже удвічі – до 3,6 аварій на рік. За останні два роки, з початку 2021 по грудень 2022 року, вже зареєстровано 10 аварій. Дослідженнями відмічаються певні сплески збільшення аварій, які мають десятирічні тренди (1975 р., 1985 р., 1995 р., 2005 р.). Характерною є загальна тенденція масових аварій з початку 2015 року, що обґрунтовується вичерпними термінами роботи багатьох гірничо-рудних підприємств (копалень) та значними (понаднормативними) термінами експлуатації хвостосховищ, які подекуди залишилися без належного нагляду і догляду.

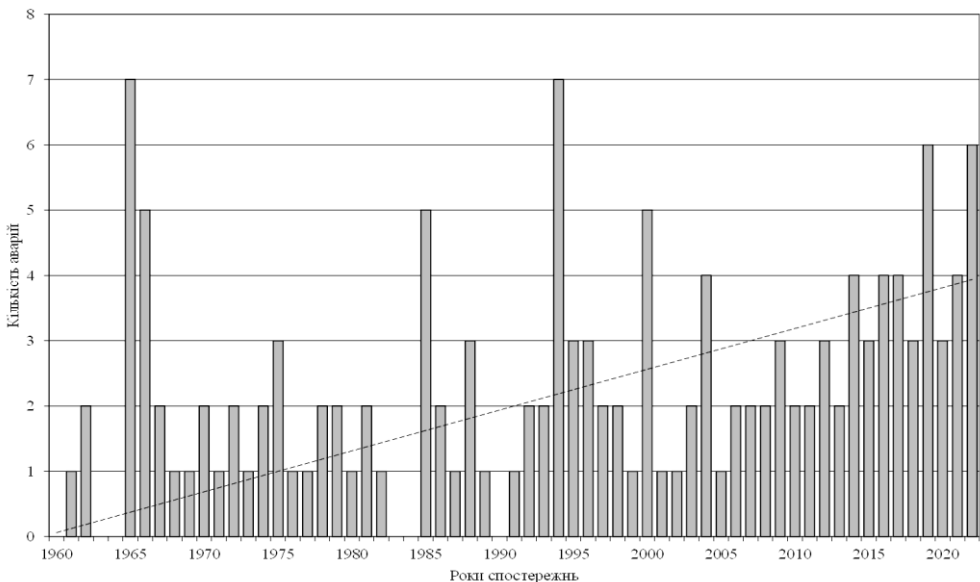


Рис. 1. Динаміка кількості та загальний тренд виникнення аварій на хвостосховищах за період з 1960 р. до 2022 р.

Щоб краще зрозуміти та виявити причини їх формування, проаналізуємо деякі з них, що за останні 10–20 років були найбільш резонансними, набули розголосу і завдали значної шкоди життю і здоров'ю людей та навколишньому

середовищу. Варто зазначити, що всі такі об'єкти закриті для оточуючих і до них немає вільного доступу, тому кількість аварій може бути значно більшою, а суспільство знає лише про ті, які завдали значної шкоди і приховати їх вже неможливо (табл. 1).

Таблиця 1. Огляд найбільш резонансних аварій за останні три десятиріччя

Об'єкт, населений пункт, країна, рік	Причина аварії	Об'єм хвостів та наслідки аварії (збитки)	Література
1	2	3	4
Хармоні, Мерріспрут, ПАР, 1994	прорив тіла греблі після сильного дощу	600 тис. м ³ хвостів видобутку золота пройшли 4 км вниз за течією, загинуло 17 осіб, значні збитки населеному пункту	[13, 14]
Ель-Порко, Болівія, 1996	прорив греблі	400 тис. т відходів цинку, свинцю і срібла протекли 300 км р.Пілкомайо	[15, 16]
Лос Фрайлес, Іспанія, 1998	обвалення греблі через порушення підвалин	4–5 млн м ³ токсичної води від виробництва цинку, свинцю, міді, срібла та шламу затопило тисячі гектарів сільськогосподарських угідь	[17]
Сурігао-дель-Норте, Філіппіни, 1999	викид хвостів із пошкодженої бетонної труби	700 тис. т ціаністих хвостів золота поховали 17 будинків під землею, 51 га рисової землі заболочено	[18]
Бая-Борша, Румунія, 2000	обвал дамби хвостосховища після сильного дощу	20 000 т хвостів, забруднених важкими металами (мідь, свинець, цинк), та 100 000 м ³ шламів забруднили струмок Васер, притоку річки Тиса	[19]
Рудник Айтік, Швеція, 2000	обвал дамби хвостосховища через фільтрацію	скид 2,5 млн м ³ рідини в сусідній відстійник, після цього викид 1,5 млн м ³ залишків шламу міді з відстійника	[20]
Інес, Кентуккі, США, 2000	обвалення дамби хвостосховища внаслідок порушення підземної копальні під накопичувачем шламу	950 тис. м ³ шламів кам'яновугільних відходів надійшли до гідрографічної мережі на відстань 120 км. Це призвело до загибелі риби в річці Біг-Сенді та деяких її притоках. Міста вздовж річки були змушені відключити забір питної води	[21]
Шахта Саса, Македонія, 2003	частковий обвал дамби в результаті руйнування дренажної системи	70 000 – 100 000 м ³ хвостів свинцю і цинку витекли на 12 кілометрів вниз за течією річки Камениця в озеро Каліманчі.	[22]
Мальвезі, Франція, 2004	прорив греблі після сильного дощу	викид 30 000 м ³ рідких уранових шламів призвів до підвищення концентрації нітратів до 170 мг/л у водопровідному каналі	[23]
Таоши, Китай, 2008	обвалення резервуару для відходів на незаконній шахті під час дощу	190 000 м ³ хвостів заліза спровокували зсув та хвилю висотою кілька метрів, яка поширилась на 2,5 км вниз за течією, засипавши базар та житлові будинки, 277 чоловік загинуло та 33 поранено	[24, 25]
Колонтар, Угорщина, 2010	обвалення греблі хвостосховища	700 000 м ³ рідкого червоного шламу виробництва бокситів затопило кілька населених пунктів, загинуло 10 осіб, постраждали 120 людей, затоплено 8 квадратних кілометрів угідь	[12]

Об'єкт, населений пункт, країна, рік	Причина аварії	Об'єм хвостів та наслідки аварії (збитки)	Література
1	2	3	4
Рудник Эль-Эрреро, Мексика, 2013	обвалення греблі хвостосховища	300 тис. м ³ відходів виробництва золота і срібла; четверо людей убито і одного поранено; річка Лос-Ремедіос в Дуранго, річка Сан-Лоренцо і водосховище Ель-Комедеро в Сіналоа забруднені, риба загинула в річці Лос-Ремедіос в 130 км нижче за течією	[26]
Шахта Столице, Сербія, 2014	обвалення греблі хвостосховища внаслідок зсуву, спровокованого сильним дощем	100 000 м ³ хвостового шламу сурми були скинуті в річку Костайник, забруднивши 27 км русла та 360 га сільськогосподарських угідь	[27]
Шахта Germano, Бразилія, 2015	обвалення дамби хвостосховища через недостатній дренаж, що призвело до розрідження хвостосховища після невеликого землетрусу	32 млн м ³ хвостів заліза затопило м. Бенту-Родрігес, зруйнували 158 будинків, 17 чоловік загинули і 2 зникли безвісти; хвости забруднили річки Північний Гуалаксо, Кармель і Ріо-Доче протяжністю 663 км, змили 15 км ² земель уздовж річок та відрізали мешканців від постачання питної води; збитки склали близько 6,7 млрд доларів США	[28, 29]
Мішор Ротем, Ізраїль, 2017	обвалення фосфогіпсової греблі	100 000 м ³ кислих токсичних стічних фосфатних вод хлинули висохлам руслом річки Ашалим і залишили слід екологічного руйнування довжиною понад 20 км	[12]
Брумадиньо, Бразилія, 2019	обвалення дамби хвостосховища	12 млн м ³ хвостів заліза спустошили наливну станцію рудника, його адміністративну частину та два менші відстійники; зруйновано міст залізничної гілки шахти та частину місцевої громади Віла Фертеко, поблизу м. Брумадиньо. В результаті 267 чоловік загинули, кілька зникли безвісти	[30]
Тіелі, Китай, 2020	порушення конструкції переливного колодезя дамби хвостосховища	2,53 млн м ³ води та хвостів молібдена досягнули річки Йідзімі через 3 км, що поставило під загрозу запаси питної води для 68 000 осіб у місті Тіелі; за кілька днів забруднення сягнуло 208 км вниз за течією	[31]
Улунди, ПАР, 2021	порушення конструкції шламової дамби	до навколишнього середовища потрапили 1 500 м ³ шламу антрацитового вугілля, що вміщують токсичні важкі метали і хімічні сполуки, включаючи ртуть, марганець, миш'як, мідь і свинець	[12]
Рудник Уільямсон, Танзанія, 2022	порушення конструкції дамби хвостосховища	12,8 млн м ³ води і хвостів алмазів сформували селеву хвилю шириною до 1 км, яка пройшла більше 8 км, охопила 5,09 км ² площі, пошкодила 13 будинків і с.-г. угіддя. Поранені 3 чол. і 115 жителів села Нгванхоло постраждали	[12]

Географія аварій на хвостосховищах досить різноманітна і охоплює держави Азії, Африки, Америки і Європи (рис. 2).

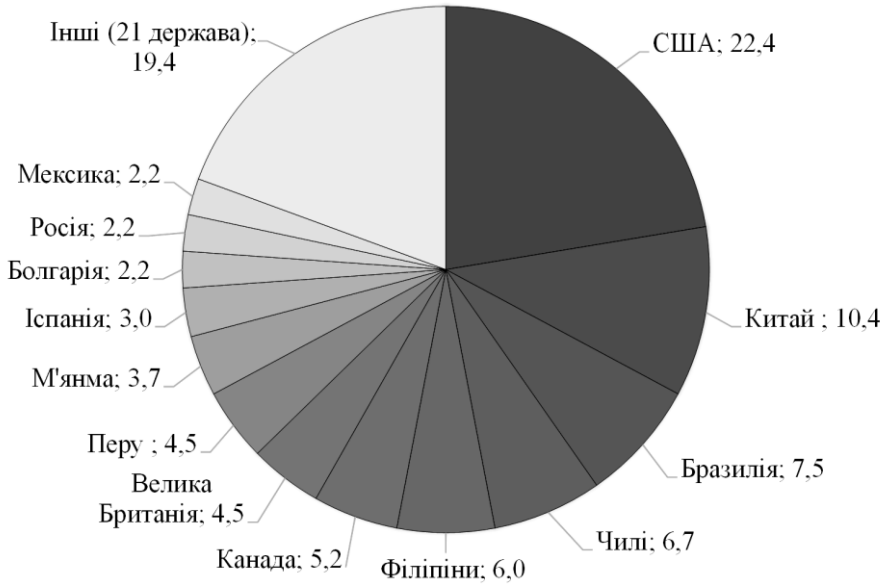


Рис. 2. Відсотковий розподіл аварій за період з 1960 р. до 2022 р.

Переважає більшість аварій за цей період сталися в 34 країнах світу. Найбільша їх кількість відмічена в США (22,4 %), Китаї (10,4%), Бразилії (7,5%), Чилі (6,7%), Філіппінах (6,0%), Канаді (5,2%), Великій Британії (4,5%) та інших країнах.

Аналіз основних причин виникнення аварій

Огляд світового досвіду та висновки експертів показали, що в ґрунтових греблях хвостосховищ отримали розвиток наступні небезпечні техногенні процеси: зсуви, суфозія, провальні явища та ін. [32–35]. Розподіл аварій за причинами їх виникнення наведено на рис. 3.

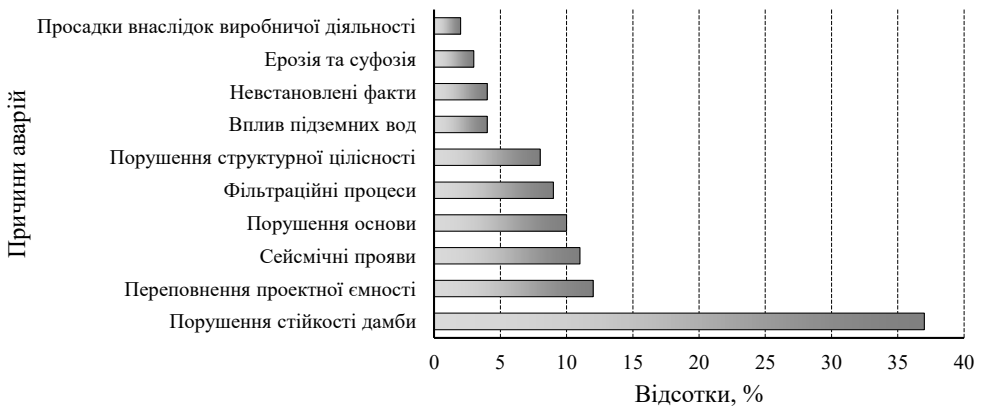


Рис. 3. Відсотковий розподіл основних причин виникнення аварій

Аналіз причин виникнення аварій на хвостосховищах вказує на комплексний техногенно-природний характер їх походження. Поруч з технічними, технологічними і конструктивними особливостями вагоме місце займають кліматичні і сейсмічні. Яскравим прикладом може бути землетрус, який відбувся в Турції і Сирії на початку лютого цього року та призвів до катастрофічних наслідків.

В результаті узагальнення встановлено, що основними причинами аварій є порушення стійкості схилу дамби (37%), переповнення проектної ємності хвостосховища (12%), сейсмічні прояви (11%) тощо.

Доволі часто причинами аварій були порушення основи і структурної цілісності тіла дамби та фільтраційні прояви. Однією із причин утворення провалів в ґрунтових греблях є розвиток суфозійних явищ і процесів. При цьому слід розрізняти механічну і хімічну суфозію гірських порід, що складають тіло ґрунтових гребель. Під механічною суфозією розуміють розпушування порід (найчастіше пісків), навіть таких, що не містять розчинних речовин, і винесення дрібних часток із них струменями води, яка фільтрується. Під хімічною суфозією слід розуміти вилугування і винесення з порід струменями води, яка фільтрується, водорозчинних солей (гіпсу, кам'яної солі і т.д.).

Під час інженерно-геологічної оцінки можливості виникнення й розвитку суфозійних явищ і утворення пустот в ґрунтових дамбах розглядаються і вивчаються, в першу чергу, чинники, представлені на схемі (рис. 4).



Рис. 4. Інженерно-геологічна оцінка можливості виникнення й розвитку суфозійних явищ і утворення пустот в ґрунтових греблях

Огляд сучасних методів діагностики технічного стану споруд

З метою забезпечення безпеки споруд необхідно розробити та забезпечити виконання заходів діагностичного, технічного, організаційного, правового, економічного та іншого характеру, спрямованих на попередження виникнення аварійних ситуацій та ліквідацію чи обмеження масштабів аварії [36, 37].

Пошуку надійного захисту і діагностики стану в різних державах приділяють багато уваги. Так, в роботі канадських вчених [38] автори пропонують комплексний підхід та диверсифіковані технології для інтегрованої системи спостереження в реальному часі для вирішення питання стійкості гребель, безпеки робітників та населення, охорони навколишнього середовища з використанням контрольно-вимірювальної апаратури.

На підставі багаторічного аналізу, що включає майже 100-річний спільний досвід провідних інженерів-геотехніків США і світу, було видано «Довідник по стійкості і стабілізації схилу». Друге видання охоплює довідникову інформацію, теорію, аналітичні методи, підходи до проектування і будівництва, а також приклади для практичного використання при повному проектуванні стійкості схилів [39].

В Туреччині для підвищення ємності хвостосховища проводяться дослідження геотехнічної характеристики і стійкості низового схилу дамби геомеханічними лабораторними випробуваннями у поєднанні з використанням емпіричних методів для визначення механічних властивостей матеріалу поточної дамби, хвостосховища та матеріалу кам'яної накидки, яка буде використовуватися для кріплення греблі [40].

У роботі польських вчених [41] представлені широкі можливості, що надаються глобальним моніторингом у справі ефективного запобігання аваріям на хвостосховищах з використанням контрольно-вимірювальних систем. Особлива увага звертається на потенціал використання різноспрямованого моніторингу, у тому числі технічного та екологічного моніторингу, на прикладі однієї з найбільших у світі гідротехнічних споруд – Сховища хвостів Железний Міст (TSF). Аналіз даних моніторингу дозволяє вживати превентивних заходів проти помилок у будівництві гребель об'єктів, які можуть мати руйнівні наслідки для життя людини та навколишнього середовища. Моніторинг навколишнього середовища найчастіше включає гідрологічний та хімічний моніторинг основних компонентів навколишнього середовища, таких як ґрунти, повітря, підземні та поверхневі води, а в рамках технічного моніторингу виконуються такі вимірювання: деформація ґрунту, викликана будівництвом, значення напруги, значення порового тиску води у хвостосховищах, зусилля та зміщення (вертикальні або горизонтальні зміщення, повороти та деформації форми). Щоб забезпечити достовірну інтерпретацію одержаних результатів, була запроваджена інтегрована база даних ГІС, в якій зберігаються всі дані вимірювань, зібрані за допомогою системи моніторингу.

На особливу увагу заслуговують нові досягнення в галузі супутникового моніторингу хвостосховища. Супутниковий моніторинг Пеньяскіто TSF (Мексика) є прикладом такого використання. З 2013 року в Пеньяскіто (Мексика) здійснюється супутниковий моніторинг, який включає щотижневі супутникові знімки середньої роздільної здатності та щомісячні супутникові знімки високої роздільної здатності та топографічні карти [42].

Як зазначають вчені з Австралії і Фінляндії [43], моніторинг геотехнічної стабільності хвостосховища в режимі реального часу дозволяє краще охарактеризувати потенційні внутрішні деформації, підйом рівня ґрунтових вод у хвостосховищах, а також аномальне просочування. Такий моніторинг дозволяє операторам хвостосховища вживати можливих заходів для пом'якшення наслідків або навіть запобігти збоям.

На переконання вчених з Канади [44] багатообіцяючими є неінвазивні методи моніторингу, такі як покадрова електрична томографія питомого опору (TL-ERT), оскільки вона надає великомасштабну інформацію про надра, яка доповнює наземні спостереження (перехід, аерофотограмметрія або дистанційне зондування) і традиційні інструменти моніторингу.

Дослідники з Канади і Австралії [45] на дамбі хвостосховища в північній частині Канади об'єднали інтерферометрію навколишнього шуму з кількісною моделлю напруги для відстеження змін швидкості поперечної хвилі (V_s). Зміни сейсмічних швидкостей менше 1% сильно корелюють з коливаннями рівня води у сусідньому хвостосховищі. Модель стресу, відкалібрована з використанням записів на рівні ставка і профілів V_s , отриманих в ході випробувань на проникнення конуса, демонструє, що зміни сейсмічної швидкості, отримані за допомогою інтерферометрії навколишнього шуму, являють собою переважно зміни V_s . Крім того, ця модель обмежує зміни V_s глибиною ~16 м, що відповідає неуцільненим хвостам під греблею. Оскільки V_s використовується для оцінки здатності ґрунтів до розрідження, цей метод дає важливі переваги для розуміння змін у роботі греблі з часом.

Китайські вчені [46, 47] зазначають, що поле фільтрації греблі хвостосховища тісно пов'язане зі станом безпеки. Оперативна оцінка безпеки поля фільтрації на основі даних моніторингу має велике значення для забезпечення безпечної експлуатації хвостосховища. Через складний вплив факторів поля фільтрації дамби хвостосховища традиційний метод ідентифікації аномалій, заснований на регресійній моделі, не працює через його низьку точність підбору. Таким чином, новий метод ідентифікації аномалій для моніторингу даних заснований на покращеній хмарній моделі та моделі нейронної мережі радіальної базової функції, яка може точно ідентифікувати дані аномалії та розрізнити відгук кількості навколишнього середовища. На основі взаємозв'язку між полем просочування та стійкістю укусу побудовано сурогатну модель між глибиною лінії насичення та коефіцієнтом безпеки стійкості укусу, а також запропоновано метод оцінки безпеки поля просочування в реальному часі.

Індійські вчені [48] звертають увагу на те, що моніторинг конструкцій відіграє життєво важливу роль, щоб мати заздалегідь певний прогноз структурних ушкоджень, які можуть бути спричинені зміною навколишнього середовища. Моніторинг стану конструкцій (SHM) має вирішальне значення при визначенні очікуваного терміну служби цивільних споруд. Удосконалення різних датчиків та систем збору даних (DAQ) дозволило більш точно прогнозувати термін служби будівельних конструкцій, що піддаються впливу статичних та динамічних умов навантаження. Отже, SHM є важливою областю досліджень для розуміння стану та терміну служби таких споруд, як греблі.

В Україні для вирішення цієї проблеми запропоновані комплексний метод оцінки індексу потенційної небезпеки впливу промислових хвостосховищ на

навколишнє середовище, метод контрольних списків, що дозволяє використання автоматизованих алгоритмів вибору природоохоронних заходів в залежності від значення оцінки відповідності вимогам безпеки об'єкта аудиту, та екологічний експрес аудит для комплексного оцінювання впливу потенційно небезпечних об'єктів з наявністю хвостосховищ на екологічну безпеку навколишнього середовища [49–51].

Крім цього, детальніше вирішити завдання діагностики технічного стану споруд дозволяють польові роботи із застосуванням комплексу геофізичних методів природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) та вертикального електричного зондування (ВЕЗ), які широко використовуються на практиці [52–59].

Навіть детальний аналіз інженерно-геологічних умов не в змозі надати точну і об'єктивну оцінку стану досліджуваного об'єкта. Тому пропонується вагому увагу приділити таким заходам, як обстеження, паспортизація, надання превентивних рекомендацій і постійний контроль за станом об'єкта.

Для попередження суфозії виконуються такі заходи:

- 1) запобігання надходженню і пересуванню води в породах: регулюється поверхневий стік, перехват підземних вод дренажними пристроями;
- 2) захист глинистих порід від вивітрювання шляхом влаштування захисних покриттів з піску, перем'ятої глини;
- 3) влаштування поверхневих дренажів (для відведення підземних вод і попередження вимивання часток);
- 4) зменшення швидкості руху підземних вод шляхом зміни конструкції споруди. Наприклад, під греблями влаштовують глиняні понури, які подовжують шлях фільтрації і знижують градієнти напору.

Висновки

1. Огляд і аналіз техногенних катастроф вказує на миттєвість їх виникнення, складність і неможливість спрогнозувати і попередити майбутню аварію, людина залишається спостерігачем і констататором фактів.
2. Аналіз причин виникнення аварій на хвостосховищах вказує на комплексний техногенно-природний характер їх походження, раптовість та низьку можливість попередження.
3. Через вичерпні терміни експлуатації, недостатність технічних наглядів і доглядів, експлуатація хвостосховищ потребує більш уважного і ретельного ставлення та розробки дієвих заходів, таких як обстеження, паспортизація, надання превентивних рекомендацій і постійний контроль за технічним станом об'єкта.
4. В якості надійного захисту і діагностики, з урахуванням кращих світових та вітчизняних практик, може слугувати комплексний підхід із застосуванням організаційно-технічних методів і підходів щодо забезпечення екологічної безпеки та надійної роботи споруд.
5. Ознаки потенційних аварій зустрічаються у різних поєднаннях, але бути виявленими шляхом простого обстеження і візуального огляду не можуть. Значну їх частину можливо виявити та спрогнозувати потенційні зміни стану споруди тільки шляхом використання контрольної-вимірної апаратури та геофізичних методів дослідження інженерно-геологічних процесів, що відбуваються в ґрунтових огорожувальних дамбах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Як вирішити проблему утилізації відходів. (n.d.). [web log]. <https://biz.nv.ua/ukr/experts/jak-virishiti-problemu-utilizatsiji-vidhodiv-2178636.html>
2. Четверик, М., Бубнова, О., & Левченко, К. (2021). Зменшення техногенного навантаження на довкілля шляхом реструктуризації комплексів «ТЕС - вугільні шахти - шламосховища» в «енерго-опріснювальні-продовольчі корпорації». *SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS VOLUME 1*. <https://doi.org/10.36074/logos-26.02.2021.v1.54>
3. Chetverik, M., Bubnova, O., Babii, K., Shevchenko, O., Moldabaev, S. (2018). Review of geomechanical problems of accumulation and reduction of mining industry wasters, and ways of their solution. *Mining of Mineral Deposits*, (12 (4)), 63-72.
4. Hapich, H., Pikarenua, D., Rudakov, L., Maximova, N., & Makarova, T. (2020). Assessment of the accident risk and calculation of the failure processes in terms of the Earth Dike of a tailing dam. *Municipal Economy of Cities*, 3(156), 99–104. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-99-104>
5. Hapich, H. (2019). Assessing level of environmental and operational safety of low-pressure hydroengineering structures. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 4, 46–52. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.4.46-52>
6. International Commission on Large Dams (ICOLD), United Nations Environment Programme (UNEP), “*Tailings dams risk of dangerous occurrences – Lessons learnt from practical experiences*” (Bulletin 121, ICOLD, 2001).
7. Hirschberg S, Spiekerman G, Dones R. (1998). *Severe Accidents in the Energy Sector. Switzerland*. 469 pp. ISSN 1019-0643.
8. Williams, D.J. (2021). Lessons from tailings dam failures – where to go from here? *Minerals*, 11(8), 853. <https://doi.org/10.3390/min11080853>
9. Rudakov, L.M., & Hapich, H.V. (2019). Modern State, dynamics of changes and prospects for the development of hydrotechnical reclamations in Dnipropetrovsk Region. *Міжвідомчий Тематичний Науковий Збірник "Меліорація і Водне Господарство"*, (1), 54–60. <https://doi.org/10.31073/mivg201901-161>
10. Hapich, H.V. (2013). Assessment of the technical condition of earth dams as an element of the environmental monitoring system of territories. *Collection works of National Mining University*, 42, 168-173. <https://core.ac.uk/download/pdf/168413168.pdf>
11. World Register of Dams. ICOLD CIGB. (n.d.). Retrieved February 22, 2023, from https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/world_register_of_dams.asp
12. WISE (World Information Service on Energy): Chronology of major tailings dam failure, 2020. Available at: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>
13. Papageorgiou, G., Fourie, A.B., & Blight, G.E. (2021). Static liquefaction of Merriespruit Gold Tailings. *Geotechnics for Developing Africa*, 61–72. <https://doi.org/10.1201/9781003211174-9>
14. Dam breach modeling. (2016). *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*, 161–221. <https://doi.org/10.1002/9781118558522.ch8>
15. Olalla, C., & Cuéllar, V. (2001). Failure mechanism of the Aznalcóllar Dam, Seville, Spain. *Géotechnique*, 51(5), 399–406. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.5.399>
16. Penman, A.D. (2003). Discussion: Failure mechanism of the aznalcóllar dam, Seville, Spain. *Géotechnique*, 53(5), 521–522. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.5.521>
17. Maglambayan, V.B., Montes, S., Hipol, K., Mamitag, M., Pineda, R.P., Rodolfo, R., Oliveros, N., & Sy, A. (2005). Carlin-type gold prospects in Surigao del Norte, Mindanao Island, Philippines: Their geology and mineralization potential. *Resource Geology*, 55(3), 145–154. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2005.tb00237.x>
18. Macklin, M.G., Brewer, P.A., Balteanu, D., Coulthard, T.J., Driga, B., Howard, A.J., & Zaharia, S. (2003). The long term fate and environmental significance of Contaminant Metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramureş County,

- upper Tisa Basin, Romania. *Applied Geochemistry*, 18(2), 241–257. [https://doi.org/10.1016/s0883-2927\(02\)00123-3](https://doi.org/10.1016/s0883-2927(02)00123-3)
19. Sammelin (Kontturi), M., Wanhainen, C., & Martinsson, O. (2011). Gold mineralogy at the Aitik Cu–Au–Ag Deposit, Gällivare area, northern Sweden. *GFF*, 133(1-2), 19–30. <https://doi.org/10.1080/11035897.2010.551542>
20. Wang, G., Tian, S., Hu, B., Xu, Z., Chen, J., & Kong, X. (2019). Evolution pattern of tailings flow from dam failure and the buffering effect of debris blocking dams. *Water*, 11(11), 2388. <https://doi.org/10.3390/w11112388>
21. Mijalkovski, S., Despodov, Z., Mirakovski, D., Hadzi-Nikolova, M., & Mitic, S. (2015). Determination and monitoring of ore recovery and dilution coefficients in Sasa lead and zinc mine - M. Kamenica, R. Macedonia. *Podzemni Radovi*, (26), 1–8. <https://doi.org/10.5937/podrad1526001m>
22. Bykov, A.A., Travin, S.O., Gromov, O.B., & Mikheev, P.I. (2014). Modeling of uranium oxides hydrofluorination process with Areva firm technology (Malvési, France). *Procedia Chemistry*, 11, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.11.002>
23. Williams, D. (2008). The influence of climate on seepage from mine waste storages during deposition and post-closure. *Proceedings of the International Conference on Mine Closure*. https://doi.org/10.36487/acg_repo/852_42
24. Wei Z., Yin G., Wang J.G., Wan L., Li G. (2013). Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: case studies of failures. *Waste Management & Research*. 31(1), 106-112. doi:10.1177/0734242X12462281
25. Winkler, D., Bidló, A., Bolodár-Varga, B., Erdő, Á., & Horváth, A. (2018). Long-term ecological effects of the red mud disaster in Hungary: Regeneration of red mud flooded areas in a contaminated industrial region. *Science of The Total Environment*, 644, 1292–1303. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.059>
26. Randelović, D., Mutić, J., Marjanović, P., Đorđević, T., & Kašanin-Grubin, M. (2019). Geochemical distribution of selected elements in flotation tailings and soils/sediments from the dam spill at the abandoned antimony mine stolice, Serbia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(6), 6253–6268. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07348-4>
27. Mura, J., Gama, F., Paradella, W., Negrão, P., Carneiro, S., de Oliveira, C., & Brandão, W. (2018). Monitoring the vulnerability of the dam and dikes in germano iron mining area after the collapse of the Tailings Dam of Fundão (Mariana-mg, Brazil) using DInSAR techniques with TerraSAR-X Data. *Remote Sensing*, 10(10), 1507. <https://doi.org/10.3390/rs10101507>
28. Agurto-Detzel, H., Bianchi, M., Assumpção, M., Schimmel, M., Collaço, B., Ciardelli, C., Barbosa, J.R., & Calhau, J. (2016). The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 4929–4936. <https://doi.org/10.1002/2016gl069257>
29. Santamarina J.C., Torres-Cruz L.A., Bachus R.C. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, 364(6440), 526-528, DOI: 10.1126/science.aax1927.
30. Yuan, Y., Gao, R., Liang, Q., Song, L., Huang, J., Lang, N., & Zhou, J. (2020). A foodborne bongkrekic acid poisoning incident – Heilongjiang Province, 2020. *China CDC Weekly*, 2(51), 975–978. <https://doi.org/10.46234/ccdcw2020.264>
31. Adeyinka, G.C., Bakare, B.F., & Iwarere, S.A. (2021). Evaluation and risk assessment of heavy metals in surface water collected along the Isipingo River, KwaZulu-Natal, South Africa. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1947265>
32. Azam S., Li Q. (2010). Tailings dam failures: A review of the last one hundred years, *Geotech*. 28, 50-53.
33. Penman A., Tedd P. (2015). Tailings dam incidents and new methods. <https://doi.org/10.1680/riacw.31395.0037>
34. Oboni F., Oboni C. (2020). Two Recent Catastrophic Tailings Dams Accidents. Tailings Dam Management for the Twenty-First Century. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19447-5_2

35. Chen C. (2022). Hazards identification and characterisation of the tailings storage facility dam failure and engineering applications. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 36(6), 399-418. DOI: 10.1080/17480930.2022.2051136
36. ДБН В.1.1-24:2009 Захист від небезпечних геологічних процесів. Основні положення проектування. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2009 р.
37. ДБН В.2.4-5:2012 Хвостосховища і шламонакопичувачі. Частина I Проектування; Частина II Будівництво. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012 р.
38. Hui S. R., Charlebois L., Sun C. (2017). Real-time monitoring for structural health, public safety, and risk management of mine tailings dams. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 55(3), 221-229. <https://doi.org/10.1139/cjes-2017-0186>
39. Abramson, L.W. (2002). *Slope stability and stabilization methods, 2nd ed.* Wiley.
40. Ozcan, N.T., Ulusay, R., & Isik, N.S. (2012). A study on geotechnical characterization and stability of downstream slope of a tailings dam to improve its storage capacity (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 69(6), 1871–1890. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2016-1>
41. Stefaniak K., Wróżyńska M. (2018). On possibilities of using global monitoring in effective prevention of tailings storage facilities failures. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 5280-5297. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0995-x>
42. Schmidt B, Malgesini M, Turner J, Reinson J (2016) Monitoring of a large tailings storage facility. <http://www.photosat.ca/pdf/Golder-satellite-monitoring-large-tailings-storage-facility-oct2015.pdf>
43. Clarkson, L., Williams, D., & Seppälä, J. (2020). Real-time monitoring of tailings dams. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 15(2), 113–127. <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1740280>
44. Dimech, A., Cheng, L. Z., Chouteau, M., Chambers, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., Meldrum, P., Mary, B., Fabien-Ouellet, G., & Isabelle, A. (2022). A review on applications of time-lapse electrical resistivity tomography over the last 30 years : Perspectives for Mining Waste Monitoring. *Surveys in Geophysics*, 43(6), 1699–1759. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>
45. Ouellet, S., Dettmer, J., Olivier, G., de Wit, T., & Lato, M. (2022). Advanced Tailings Dam Performance Monitoring with seismic noise and stress models. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1647118/v1>
46. Li S.M., Yuan L.W., Yang H., An H.M., Wang G.J. (2020). Tailings dam safety monitoring and early warning based on spatial evolution process of mud-sand flow. *Safety Sci.* 124, 104579. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104579>
47. Dong, K., Yang, D., Yan, J., Sheng, J., Mi, Z., Lu, X., & Peng, X. (2022). Anomaly identification of monitoring data and safety evaluation method of tailings dam. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1016458>
48. Sivasuriyan, A., Vijayan, D.S., Munusami, R., & Devarajan, P. (2021). Health Assessment of dams under various environmental conditions using structural health monitoring techniques: A state-of-art review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57), 86180–86191. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16749-3>
49. Shmatkov G.G. Environmental Problems in Ukraine and Human Factors / G.G. Shmatkov, A.F. Oksamitny, I.A. Nikolaieva // Correlation Between Human Factors and the Prevention of Disasters / edited by David L. Barry, Wilhelm G. Coldewey, Dieter W.G. Reimer, Dmytro V. Rudakov. – Amsterdam : IOS Press, 2012. – (NATO Science for peace and security series. Sub-series E: Human and societal dynamics ; Vol. 94). – P. 218–223.
50. Rudakov D.A. Checklist method as a tool to improve public safety in TMF affected areas / D. Rudakov, I. Nikolaieva // Engaging the public to fight the consequences of terrorism and disasters / edited by I. Apostol, J. Mamasakhlisi, D. Subotta, D. W.G. Reimer. – Amsterdam : IOS Press, 2015. – (NATO Science for peace and security series. Sub-series E: Human and societal dynamics ; Vol. 120). – P. 139–147.

51. Николаева И.А. Контрольный список как инструмент повышения экологической безопасности хвостохранилищ / И.А. Николаева, Д.В. Рудаков // Форум гірників-2014: матеріали міжнар. конф., 1-4 жовтня 2014 р. – Дніпропетровськ : ЛізуновПрес, 2014. – Т. 1. – С. 190–198.
52. Bogoslovsky V.A., Ogilvy A.A. (1970). Application of geophysical methods for studying the technical status of earth dams. *Geophysical Prospecting*. 18(1), 758-773. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1970.tb02141.x>
53. Kim Jung-Ho, Yi Myeong-Jong, Song Yoonho, Seol Soon Jee, Kim Ki-Seog. (2020). Application of Geophysical Methods to the Safety Analysis of an Earth Dam. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 12(2), 221-235. <https://doi.org/10.2113/JEEG12.2.221>
54. Lai Sin-Long, Lee Der-Her, Wu Jian-Hong, Dong Yan-Min. (2014). Detecting the cracks and seepage line associated with an earthquake in an earth dam using the nondestructive testing technologies. *Journal of the Chinese Institute of Engineer*. 37(4), 428-437. <https://doi.org/10.1080/02533839.2013.799949>
55. Sung-Ho Song, Yoonho Song, Byung-Doo Kwon. (2005). Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam. *Exploration Geophysics*. 36, 92-96. <https://doi.org/10.1071/EG05092>
56. Rudakov, L.M., Hapich, H.V., Orlinska, O.V., Pikarenia, D.S., Kovalenko, V.V., Chushkina, I.V., & Zaporozhchenko, V.Y. (2020). Problems of technical exploitation and ecological safety of hydrotechnical facilities of Irrigation Systems. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(4), 776–788. <https://doi.org/10.15421/112070>
57. Hapich, H., Pikarenia, D., Orlinska, O., Kovalenko, V., Rudakov, L., Chushkina, I., Maksymova, N., Makarova, T., & Katsevych, V. (2022). Improving the system of technical diagnostics and environmentally safe operation of soil hydraulic structures on small rivers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (116), 18–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255167>
58. Orlinska, O., Pikarenia, D., Chushkina, I., Maksymova, N., Hapich, H., Rudakov, L., Roubik, H., & Rudakov, D. (2022). Features of water seepage from the retention basins of irrigation systems with different geological structures. *Industrial, Mechanical And Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1063/5.0109330>
59. Orlinska, O.V., Pikarenia, D.S., Maximova, N.M., Gapich, G.V., Ischenko, V.M. (2012). Evaluation of strength properties of soil dams by method of natural pulse electromagnetic field of the Earth. *Coll. works of National Mining University*, 37, 17-23.

Стаття надійшла до редакції 03.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 13.06.2023

REFERENCES

1. Yak vyrishyty problemu utylizatsiyi vidkhodiv. (n.d.). [web log]. Retrieved from <https://biz.nv.ua/ukr/experts/jak-virishiti-problemu-utilizatsiji-vidkhodiv-2178636.html> [in Ukrainian].
2. Chetverik, M., Bubnova, O., & Levchenko, K. (2021). Reduction of man-made load on the environment by restructuring the "TPP - coal mines - sludge storage" complexes into "energy-desalination-food corporations". *SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS VOLUME 1* [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36074/logos-26.02.2021.v1.54>
3. Chetverik, M., Bubnova, O., Babii, K., Shevchenko, O., & Moldabaev, S. (2018). Review of geomechanical problems of accumulation and reduction of mining industry wasters, and ways of their solution. *Mining of Mineral Deposits*, (12 (4)), 63-72.
4. Hapich, H., Pikarenia, D., Rudakov, L., Maximova, N., & Makarova, T. (2020). Assessment of the accident risk and calculation of the failure processes in terms of the Earth

- Dike of a tailing dam. *Municipal Economy of Cities*, 3(156), 99–104. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-99-104>
5. Hapich, H. (2019). Assessing level of environmental and operational safety of low-pressure hydroengineering structures. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 4, 46–52. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.4.46-52>
 6. International Commission on Large Dams (ICOLD), United Nations Environment Programme (UNEP), “*Tailings dams risk of dangerous occurrences – Lessons learnt from practical experiences*” (Bulletin 121, ICOLD, 2001).
 7. Hirschberg, S., Spiekerman, G., & Dones, R. (1998). Severe Accidents in the Energy Sector. Switzerland. 469 pp. ISSN 1019-0643.
 8. Williams, D.J. (2021). Lessons from tailings dam failures – where to go from here? *Minerals*, 11(8), 853. <https://doi.org/10.3390/min11080853>
 9. Rudakov, L.M., & Hapich, H.V. (2019). Modern State, dynamics of changes and prospects for the development of hydrotechnical reclamations in Dnipropetrovsk Region. *Mizhvidomchyy Tematychnyy Naukovyy Zbirnyk "Melioratsiya i Vodne Hospodarstvo"*, (1), 54–60. <https://doi.org/10.31073/mivg201901-161>
 10. Hapich, H.V. (2013). Assessment of the technical condition of earth dams as an element of the environmental monitoring system of territories. *Collection works of National Mining University*, 42, 168-173. <https://core.ac.uk/download/pdf/168413168.pdf>
 11. World Register of Dams. ICOLD CIGB. (n.d.). Retrieved February 22, 2023, from https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/world_register_of_dams.asp
 12. WISE (World Information Service on Energy): Chronology of major tailings dam failure, 2020. Retrieved from <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>
 13. Papageorgiou, G., Fourie, A.B., & Blight, G.E. (2021). Static liquefaction of Merriespruit Gold Tailings. *Geotechnics for Developing Africa*, 61–72. <https://doi.org/10.1201/9781003211174-9>
 14. Dam breach modeling. (2016). *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*, 161–221. <https://doi.org/10.1002/9781118558522.ch8>
 15. Olalla, C., & Cuéllar, V. (2001). Failure mechanism of the Aznalcóllar Dam, Seville, Spain. *Géotechnique*, 51(5), 399–406. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.5.399>
 16. Penman, A.D. (2003). Discussion: Failure mechanism of the aznalcóllar dam, Seville, Spain. *Géotechnique*, 53(5), 521–522. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.5.521>
 17. Maglambayan, V.B., Montes, S., Hipol, K., Mamitag, M., Pineda, R.P., Rodolfo, R., Oliveros, N., & Sy, A. (2005). Carlin-type gold prospects in Surigao del Norte, Mindanao Island, Philippines: Their geology and mineralization potential. *Resource Geology*, 55(3), 145–154. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2005.tb00237.x>
 18. Macklin, M.G., Brewer, P.A., Balteanu, D., Coulthard, T.J., Driga, B., Howard, A.J., & Zaharia, S. (2003). The long term fate and environmental significance of Contaminant Metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramureş County, upper Tisa Basin, Romania. *Applied Geochemistry*, 18(2), 241–257. [https://doi.org/10.1016/s0883-2927\(02\)00123-3](https://doi.org/10.1016/s0883-2927(02)00123-3)
 19. Sammelin (Kontturi), M., Wanhainen, C., & Martinsson, O. (2011). Gold mineralogy at the Aitik Cu–Au–Ag Deposit, Gällivare area, northern Sweden. *GFF*, 133(1-2), 19–30. <https://doi.org/10.1080/11035897.2010.551542>
 20. Wang, G., Tian, S., Hu, B., Xu, Z., Chen, J., & Kong, X. (2019). Evolution pattern of tailings flow from dam failure and the buffering effect of debris blocking dams. *Water*, 11(11), 2388. <https://doi.org/10.3390/w11112388>
 21. Mijalkovski, S., Despodov, Z., Mirakovski, D., Hadzi-Nikolova, M., & Mitic, S. (2015). Determination and monitoring of ore recovery and dilution coefficients in Sasa lead and zinc mine - M. Kamenica, R. Macedonia. *Podzemni Radovi*, (26), 1–8. <https://doi.org/10.5937/podrad1526001m>
 22. Bykov, A.A., Travin, S.O., Gromov, O.B., & Mikheev, P.I. (2014). Modeling of uranium oxides hydrofluorination process with Areva firm technology (Malvési, France). *Procedia Chemistry*, 11, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.11.002>

23. Williams, D. (2008). The influence of climate on seepage from mine waste storages during deposition and post-closure. In *Proceedings of the International Conference on Mine Closure*. https://doi.org/10.36487/acg_repo/852_42
24. Wei Z., Yin G., Wang J.G., Wan L., & Li G. (2013). Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: case studies of failures. *Waste Management & Research*, 31(1), 106-112. doi:10.1177/0734242X12462281
25. Winkler, D., Bidló, A., Bolodár-Varga, B., Erdő, Á., & Horváth, A. (2018). Long-term ecological effects of the red mud disaster in Hungary: Regeneration of red mud flooded areas in a contaminated industrial region. *Science of The Total Environment*, 644, 1292–1303. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.059>
26. Randelović, D., Mutić, J., Marjanović, P., Dorđević, T., & Kašanin-Grubin, M. (2019). Geochemical distribution of selected elements in flotation tailings and soils/sediments from the dam spill at the abandoned antimony mine stolice, Serbia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(6), 6253–6268. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07348-4>
27. Mura, J., Gama, F., Paradella, W., Negrão, P., Carneiro, S., de Oliveira, C., & Brandão, W. (2018). Monitoring the vulnerability of the dam and dikes in germano iron mining area after the collapse of the Tailings Dam of Fundão (Mariana-mg, Brazil) using DInSAR techniques with TerraSAR-X Data. *Remote Sensing*, 10(10), 1507. <https://doi.org/10.3390/rs10101507>
28. Agurto-Detzel, H., Bianchi, M., Assumpção, M., Schimmel, M., Collaço, B., Ciardelli, C., Barbosa, J. R., & Calhau, J. (2016). The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 4929–4936. <https://doi.org/10.1002/2016gl069257>
29. Santamarina J.C., Torres-Cruz L.A., & Bachus R.C. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, 364(6440), 526-528. <https://doi.org/10.1126/science.aax1927>
30. Yuan, Y., Gao, R., Liang, Q., Song, L., Huang, J., Lang, N., & Zhou, J. (2020). A foodborne bongkreik acid poisoning incident – Heilongjiang Province, 2020. *China CDC Weekly*, 2(51), 975–978. <https://doi.org/10.46234/ccdcw2020.264>
31. Adeyinka, G.C., Bakare, B.F., & Iwarere, S.A. (2021). Evaluation and risk assessment of heavy metals in surface water collected along the Isipingo River, KwaZulu-Natal, South Africa. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1947265>
32. Azam, S., & Li, Q. (2010). Tailings dam failures: A review of the last one hundred years, *Geotech.*, 28, 50-53.
33. Penman, A., & Tedd, P. (2015). Tailings dam incidents and new methods. <https://doi.org/10.1680/riacw.31395.0037>
34. Oboni, F., & Oboni, C. (2020). Two Recent Catastrophic Tailings Dams Accidents. Tailings Dam Management for the Twenty-First Century. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19447-5_2
35. Chen, C. (2022). Hazards identification and characterisation of the tailings storage facility dam failure and engineering applications. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 36(6), 399-418. <https://doi.org/10.1080/17480930.2022.2051136>
36. DBN V.1.1-24:2009. Protection against dangerous geological processes. The main design provisions. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2009.
37. DBN V.2.4-5:2012. Tailings storage facility and sludge accumulators. Part I Design; Part II Construction. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2012.
38. Hui, S. R., Charlebois, L., & Sun, C. (2017). Real-time monitoring for structural health, public safety, and risk management of mine tailings dams. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55(3), 221-229. <https://doi.org/10.1139/cjes-2017-0186>
39. Abramson, L.W. (2002). *Slope stability and stabilization methods*, 2nd ed. Wiley.

40. Ozcan, N.T., Ulusay, R., & Isik, N.S. (2012). A study on geotechnical characterization and stability of downstream slope of a tailings dam to improve its storage capacity (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 69(6), 1871–1890. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2016-1>
41. Stefaniak, K., & Wróżyńska, M. (2018). On possibilities of using global monitoring in effective prevention of tailings storage facilities failures. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 5280–5297. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0995-x>
42. Schmidt, B., Malgesini, M., Turner, J., & Reinson, J. (2016). Monitoring of a large tailings storage facility. Retrieved from <http://www.photosat.ca/pdf/Golder-satellite-monitoring-large-tailings-storage-facility-oct2015.pdf>
43. Clarkson, L., Williams, D., & Seppälä, J. (2020). Real-time monitoring of tailings dams. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 15(2), 113–127. <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1740280>
44. Dimech, A., Cheng, L. Z., Chouteau, M., Chambers, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., Meldrum, P., Mary, B., Fabien-Ouellet, G., & Isabelle, A. (2022). A review on applications of time-lapse electrical resistivity tomography over the last 30 years: Perspectives for Mining Waste Monitoring. *Surveys in Geophysics*, 43(6), 1699–1759. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>
45. Ouellet, S., Dettmer, J., Olivier, G., de Wit, T., & Lato, M. (2022). Advanced Tailings Dam Performance Monitoring with seismic noise and stress models. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1647118/v1>
46. Li, S.M., Yuan, L.W., Yang, H., An, H.M., & Wang, G.J. (2020). Tailings dam safety monitoring and early warning based on spatial evolution process of mud-sand flow. *Safety Sci.*, 124, 104579. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104579>
47. Dong, K., Yang, D., Yan, J., Sheng, J., Mi, Z., Lu, X., & Peng, X. (2022). Anomaly identification of monitoring data and safety evaluation method of tailings dam. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1016458>
48. Sivasuriyan, A., Vijayan, D. S., Munusami, R., & Devarajan, P. (2021). Health Assessment of dams under various environmental conditions using structural health monitoring techniques: A state-of-art review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(57), 86180–86191. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16749-3>
49. Shmatkov, G.G., Oksamitny, A.F., Nikolaieva, I.A. (2012). Environmental Problems in Ukraine and Human Factors. In *Correlation Between Human Factors and the Prevention of Disasters* (eds. David L. Barry, Wilhelm G. Coldewey, Dieter W.G. Reimer, Dmytro V. Rudakov). (NATO Science for peace and security series. Sub-series E: Human and societal dynamics; Vol. 94, pp. 218–223). Amsterdam: IOS Press.
50. Rudakov, D.A., Nikolaieva, I.A. (2015). Checklist method as a tool to improve public safety in TMF affected areas. In *Engaging the public to fight the consequences of terrorism and disasters* (eds. I. Apostol, J. Mamasakhlisi, D. Subotta, D. W.G. Reimer). (NATO Science for peace and security series. Sub-series E: Human and societal dynamics; Vol. 120, pp. 139–147). Amsterdam : IOS Press.
51. Nikolaeva, I.A., & Rudakov, D.V. (2014). Checklist as a tool to improve the environmental safety of tailings storage facility. In *Forum of miners-2014: materials of the international conf.* (Vol. 1, pp. 190–198). Dnipropetrovsk: LizunovPres.
52. Bogoslovsky, V.A., Ogilvy, A.A. (1970). Application of geophysical methods for studying the technical status of earth dams. *Geophysical Prospecting*, 18(1), 758–773. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1970.tb02141.x>
53. Kim Jung-Ho, Yi Myeong-Jong, Song Yoonho, Seol Soon Jee, Kim Ki-Seog. (2020). Application of Geophysical Methods to the Safety Analysis of an Earth Dam. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 12(2), 221–235. <https://doi.org/10.2113/JEEG12.2.221>
54. Lai Sin-Long, Lee Der-Her, Wu Jian-Hong, Dong Yan-Min. (2014). Detecting the cracks and seepage line associated with an earthquake in an earth dam using the nondestructive testing technologies. *Journal of the Chinese Institute of Engineer*, 37(4), 428–437. <https://doi.org/10.1080/02533839.2013.799949>

55. Sung-Ho Song, Yoonho Song, Byung-Doo Kwon. (2005). Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam. *Exploration Geophysics*, 36, 92-96. <https://doi.org/10.1071/EG05092>
56. Rudakov, L.M., Hapich, H.V., Orlinska, O.V., Pikarenia, D.S., Kovalenko, V.V., Chushkina, I.V., & Zaporozhchenko, V.Y. (2020). Problems of technical exploitation and ecological safety of hydrotechnical facilities of Irrigation Systems. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(4), 776–788. <https://doi.org/10.15421/112070>
57. Hapich, H., Pikarenia, D., Orlinska, O., Kovalenko, V., Rudakov, L., Chushkina, I., Maksymova, N., Makarova, T., & Katsevych, V. (2022). Improving the system of technical diagnostics and environmentally safe operation of soil hydraulic structures on small rivers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (116)), 18–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255167>
58. Orlinska, O., Pikarenia, D., Chushkina, I., Maksymova, N., Hapich, H., Rudakov, L., Roubik, H., & Rudakov, D. (2022). Features of water seepage from the retention basins of irrigation systems with different geological structures. *Industrial, Mechanical And Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1063/5.0109330>
59. Orlinska, O.V., Pikarenia, D.S., Maximova, N.M., Hapich, G.V., Ischenko, V.M. (2012). Evaluation of strength properties of soil dams by method of natural pulse electromagnetic field of the Earth. *Coll. works of National Mining University*, 37, 17-23.

The article was received 03.03.2023 and was accepted after revision 13.06.2023

Рудаків Леонід Миколайович

кандидат с.-г. наук, доцент, Дніпровський державний аграрно-економічний університет

Адреса робоча: вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49600

ORCID ID: 0000-0001-7277-7220 **e-mail:** rudakov.l.m@dsau.dp.ua

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

UDC 656.02

Vitaliy Tsopa¹, Doctor of Technical Sciences, Professor
ORCID ID: 0000-0002-4811-3712 *e-mail*: dr.tsopav@gmail.com

Serhii Cheberiachko², Doctor of Technical Sciences, Professor
ORCID ID: 0000-0001-5866-4393 *e-mail*: cheberiachkoyi@ukr.net

Olena Yavorska², Candidate of Technical Science, Professor
ORCID ID: 0000-0001-5516-5310 *e-mail*: elenayavorska80@gmail.com

Tetiana Nehrii³, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
ORCID ID: 0000-0002-4239-3178 *e-mail*: tetiana.nehrii@donntu.edu.ua

Tetiana Tkachenko³, Doctor of Technical Sciences, Professor
ORCID ID: 0000-0003-2105-595 *e-mail*: tkachenkoknuba@gmail.com

Oleg Deryugin², Candidate of Technical Science, Associate Professor
ORCID ID: 0000-0002-2456-7664 *e-mail*: deryugin_o@ukr.net

¹International Management Institute, Kyiv, Ukraine

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

³Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

FEATURES OF THE ASSESSMENT OF OCCUPATIONAL RISKS IN TRUCK TRANSPORTATION

***Abstract.** The purpose of the article is to develop a process of managing the professional (dynamic) risks in freight transportation due to changes in time of dangerous factors.*

To build the process of managing the professional (dynamic) risks of truck transportation, the main principles of system dynamics using the "tie-butterfly" model for establishment the causal and reciprocal relationships between dangerous factors affecting the drive were used.

A model of the connection of dangerous factors of the internal and external environment of the organization, related to their negative impact on the increase in the probability of the occurrence of a dangerous event (incident) and the degree of severity over time, has been developed. Based on the interaction of the probability of the occurrence of a dangerous event and the severity of the consequences, taking into account changes in the physical and psychological state of the driver, it became possible to develop a dynamic model for assessing the driver's professional risk. Changes in professional (dynamic) risks during the time of a truck driver are

proposed for analysis: by hours of the day (from 00:00-24:00 hours); by days of the week (Monday, Tuesday, Wednesday, Thursday, Friday, Saturday, Sunday); by season (spring, summer, autumn, winter). Taking into account the interaction of three main components: the presence of a threat or danger, the interaction between a truck and a person, the presence of a catalyst (physical and psychological state of the driver), the amount of professional risk is determined. To check the adequacy of the assessments, taking into account the change in the influence of dangerous factors on the probability of the occurrence of a dangerous event and the degree of severity of injuries from it with a time, an algorithm that allows to monitor every step in the management of professional risks was developed. It was established that an unacceptable level of risk is fixed at night and in winter, under inappropriate climatic conditions, which requires the development of effective safety precautions. The scientific novelty consists in the justification of a dynamic model from assessing the professional risk of a driver, based on the interaction of the probability of the occurrence of a dangerous event and the severity of the consequences, taking into account changes in the physical and psychological state of the driver. The practical significance lies in the development of forms for assessing the driver's professional risk.

Key words: labor safety; occupational risk; risk assessment; traffic accident; dynamic model.

В.А. Цопа¹, С.І. Чеберячко², О.О. Яворська², Т.О. Негрій³, Т.М. Ткаченко³, О.В. Дерюгін²

¹Міжнародний інститут менеджменту, м. Київ, Україна

²Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна

³Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ ПРИ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

Анотація. Метою статті є розробка процесу керування професійними (динамічними) ризиками при вантажних перевезеннях через зміни в часі небезпечних чинників.

Для побудови процесу керування професійними (динамічними) ризиками вантажних автомобільних перевезень використали основні принципи системної динаміки із застосуванням моделі «краватка-метелик» для встановлення причинно-наслідкових та зворотних зв'язків між небезпечними чинниками, що діють на водія.

Розроблена модель зв'язку небезпечних чинників внутрішнього та зовнішнього середовища організації, пов'язаних з їх негативним впливом на зростання вірогідності настання небезпечної події (інциденту) та ступеня тяжкості в часі. Це дозволило розробити на основі взаємодії ймовірності настання небезпечної події та тяжкості наслідків, з урахуванням зміни фізичного і психологічного стану водія, динамічну модель оцінки професійного ризику водія. Для аналізу запропоновано зміни професійних (динамічних) ризиків в часі водія вантажного автомобіля: за годинами доби (з 00.00-24.00 години); за днями тижня (понеділок, вівторок, середа, четвер, п'ятниця, субота, неділя); за сезоном року (весна, літо, осінь, зима). З урахуванням взаємодії трьох основних складових: наявності загрози чи небезпеки, взаємодії між вантажним автомобілем і людиною, наявності каталізатора (фізичний і психологічний стан водія) проводиться визначення величини професійного ризику. Для перевірки адекватності проведених оцінок, з урахуванням зміни

впливу небезпечних чинників на вірогідність настання небезпечної події та ступеня тяжкості травм від неї з урахуванням часу, розроблено алгоритм, який дозволяє відслідкувати кожен крок керування професійними ризиками. Встановлено, що неприйнятний рівень ризику фіксується в нічну пору доби та в зимовий час, при невідповідних кліматичних умовах, що потребує розробки дієвих запобіжних заходів з безпеки.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні динамічної моделі з оцінки професійного ризику водія на основі взаємодії ймовірності настання небезпечної події та тяжкості наслідків з урахуванням зміни фізичного і психологічного стану водія.

Практичне значення полягає у розробці форм оцінки професійного ризику водія.

Ключові слова: безпека праці; професійний ризик; оцінка ризику; дорожньо-транспортна пригода; динамічна модель.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.85-99>

Вступ

Безпека вантажних автомобільних перевезень (далі – ВАП) є важливою складовою загальної системи управління безпеки дорожнього руху будь-якого автотранспортного підприємства, яка спрямована на збереження здоров'я і життя водіїв і ефективне використання автомобільного парку для здійснення транспортної діяльності. Основою такої системи безпеки є оцінка професійних ризиків: виявлення загроз і небезпек, які виникають у процесі транспортної діяльності, та пошук і прийняття управлінських рішень, які спрямовані для їх контролю, управління з метою мінімізації на всіх етапах ВАП.

Для виконання зазначеної процедури дослідження професійних ризиків найбільш часто застосовуються методи структурної декомпозиції, наприклад: дерево відмов, дерево рішень, дерево ймовірностей; метод експертного дослідження в основному включає: метод мозкового штурму, метод Delphi та ін. [1, 2, 3, 4]. Обидва зазначених методи дозволяють провести досить якісний аналіз професійних ризиків, але без урахування взаємодії небезпечних факторів у часі. Справа в тому, що складні обставини праці водіїв при керуванні автомобілем характеризуються впливом факторів, які поєднують експлуатаційні властивості автомобіля, дорожні, кліматичні умови, а також проявом взаємозалежних екстремальних ситуацій в часто змінних обставинах дорожнього руху, що потребує підбору відповідних методів з оцінки ризиків виникнення дорожньо-транспортної пригоди (далі – ДТП), які б дозволили зменшити невизначеність розрахунків ризику.

Одним із таких підходів є імітаційний метод моделювання процесу ризику скоєння ДТП за допомогою системної динаміки, який дозволяє побачити сутність різносторонніх процесів, що характеризують ВАП, й ефективно управляти ними на основі виявлення зворотних зв'язків, які відображають істотні властивості модельованого процесу [5, 6, 7]. Таким чином, з'являється досить актуальна задача у встановленні причинно-наслідкових зв'язків між різними складовими процесу ВАП для ілюстрації взаємодії небезпечних факторів і загроз, що впливають на його безпеку, для виявлення прогностичних тенденцій розвитку різних сценаріїв і їх впливу на господарську, фінансову і транспортну діяльність автотранспортного підприємства.

Аналіз літературних джерел

Тема безпеки ВАП є досить актуальною. Про це свідчить значна кількість різних наукових публікацій, які різносторонньо розглядають дане питання. Так, за словами авторів роботи [8], Україна приречена приділяти пильну увагу питанням транспортної безпеки та створенню найкращих умов для функціонування єдиного європейського ринку шляхом формування мультимодальної Транс'європейської транспортної мережі (TEN-T). Бачення автора статті фокусується на необхідності входження вітчизняної транспортної безпеки до Європейської системи, що вимагає запровадження низки вимог. Однією з таких є удосконалення системи управління безпекою, нагляду й контролю на транспорті відповідно до міжнародних стандартів на основі оцінки ризиків. Це вимагає побудови відповідних моделей, які дозволять прогнозувати динаміку розвитку системи перевезень. В якості продовження інтеграції до європейської системи транспортної безпеки в нашій країні пропонується удосконалити державно-управлінські функції на основі чіткого дотримання обраних пріоритетів щодо правових, організаційних, матеріальних та інформаційних показників для поєднання зусиль органів державної влади й місцевого самоврядування [9]. Однак в статті не наведено моделі для поєднання цих зусиль, яка дозволить визначити притаманні нашій країні загрози і небезпеки для вітчизняних підприємств.

В статті [10] розглянуто можливість удосконалення системи заходів безпеки в аеропортах завдяки побудові імітаційних моделей для багатьох поширених завдань, з метою оперативного виявлення та усунення можливих загроз. Автори запропонували проводити оцінку ефективності авіаційної безпеки через визначення внутрішніх і зовнішніх факторів, які формують основу для появи небезпечних ситуацій. В той же час, побудова моделі базується на стаціонарних процесах, тобто фактор часу, на жаль, не враховується.

Мета роботи

Розробити процес керування професійними (динамічними) ризиками через зміни в часі небезпечних чинників при вантажних перевезеннях.

Матеріали і методи

Для побудови *процесу керування професійними (динамічними) ризиками* ВАП використовуємо основні принципи системної динаміки [11]. Це дозволить встановити причинно-наслідкові зв'язки та петлі зворотних зв'язків між небезпечними чинниками, що діють на водія.

Метод системної динаміки складається з п'яти кроків (табл. 1).

Перший крок. Формулювання проблеми, для якої проводиться аналіз ситуації, визначаються дві групи небезпечних чинників, які впливають на безпеку ВАП – зовнішні та внутрішні (рис. 1).

Таблиця 1. Огляд методології системної динаміки

Крок процесу	Мета/Завдання кроку	Опис кроку
Встановлення проблеми	Визначення факторів, межі їх змін, оцінка впливу на процес, опис джерел	Збір даних про об'єкт дослідження: робота зі статистичною документацією, опитування працівників, аналіз поточної ситуації чи відомих моделей
Розробка гіпотези	Пояснення динаміки процесу, що розглядається	Встановлення причинно-наслідкових зв'язків, встановлення структурних зв'язків, відображення зворотних впливів, визначення основних змінних в часі
Побудова моделі	Перехід від якісного опису до кількісного представлення моделі	Побудова моделі, оцінка параметрів, узгодження моделі із прийнятою гіпотезою
Тестування моделі	Визначення адекватності моделі	Порівняння результатів з еталоном чи з експериментальними даними, аналіз невизначеності
Розробка рекомендацій	Встановлення запобіжних заходів, розробка управлінських рішень	Розробка рекомендацій щодо зменшення рівнів ризику



Рис. 1. Модель зв'язку чинників середовища організації, пов'язаних з впливом часу (результат – зміна професійних ризиків)

Другий крок. Розробка гіпотези, яка передбачає взаємодію між різними елементами транспортної системи, що визначають професійні ризики. Для цього скористаємось загальновідомою системою "водій – автомобіль – дорога – навколишнє середовище" (далі – "ВАДС"), що пов'яже безліч елементів, які знаходяться у взаємодії один з одним та утворюють певну цілісність, єдність [12].

Відповідно до особливостей системи "ВАДС" були обрані, в якості змінних стану системи для оцінки ризику виникнення ДТП, наступні критерії: психофізіологічний стан водія, тривалість роботи/відпочинку, стаж роботи,

експлуатаційні властивості вантажного автомобіля, технічний стан, строк експлуатації та ін. Також були враховані і допоміжні змінні – спеціальні умови, які характеризують діяльність автотранспортного підприємства. Крім того, увага була приділена і впливу кліматичних та дорожніх умов, як-то: зміна погодних умов, наявність опадів, стихійні лиха, наявність заторів, складних розв'язок.

Графік руху, який поєднує час знаходження водія за кермом і відпочинок від керування транспортним засобом, є одним із елементів, який має вирішальне значення, тому до нього теж привернуто увагу під час оцінки ризику виникнення ДТП. Порушення графіка руху може призвести до збільшення ризику виникнення ДТП через перевищення швидкості через зміну психоемоційного стану водія та інше.

Третій крок. Будуємо кількісну модель оцінки динамічних ризиків на основі виявлених механізмів зворотного зв'язку. Для цього скористаємось методом «Краватка-метелик» (рис. 2) з урахуванням впливу часу через певні проміжки, в яких є зміна небезпечних чинників:

1. **За годинами доби:** з 00.00-24.00 години.
2. **За днями тижня:** понеділок, вівторок, середа, четвер, п'ятниця, субота, неділя.
3. **За сезоном року:** весна, літо, осінь, зима.

При цьому величину професійного ризику будемо оцінювати за наступною формулою:

$$R = I(t) \cdot B(t), \tag{1}$$

де R – ризик виникнення небезпечної події; $I(t)$ – ймовірність появи небезпеки з урахуванням певного часового проміжку; B – тяжкість втрати, яка залежить від часу надання допомоги.



Рис. 2. Модель керування професійними ризиками при зміні чинників зовнішнього та внутрішнього середовища організації в часі

Для оцінки ризику пропонується дещо вдосконалений процес, який, на відміну від класичних підходів, поділяє професійні ризики на три основні типи: прийнятний, прийнятний з перевіркою, неприйнятний (табл. 2).

Таблиця 2. Класифікація професійних ризиків

№	Оцінка ризику	Бали
1	Прийнятний ПР	від 0 до 130
2	Прийнятний ПР з перевіркою	від 131 до 260
3	Неприйнятний ПР	вище 261

Для кожної небезпеки і небезпечної події (далі – НП) можна визначити підсумковий ПР з урахуванням впливу кожного зовнішнього і внутрішнього небезпечного чинника, а для оцінки вірогідності настання НП та ступеня тяжкості можна скористатись 8-бальною шкалою: де 1 – НП не відбувається чи наслідки відсутні, а 8 – НП відбувається постійно протягом визначеного періоду або важкість наслідків (травма чи професійне захворювання) – зі смертельним наслідком. Більш детально про саму шкалу для оцінки ПР можна ознайомитись у роботі [13].

Такий підхід дозволяє оцінити певну ймовірність настання небезпечної події в деякому часовому проміжку, що дозволяє встановити відповідний ступінь тяжкості травм теж в часі.

Четвертий крок. Передбачає перевірку реалістичності розробленої моделі з оцінки ризиків – визначення її адекватності. Для забезпечення перевірки адекватності проведених оцінок пропонуємо скористатись алгоритмом, який дозволяє відслідкувати кожен крок з керування професійними ризиками з урахуванням зміни впливу небезпечних чинників на вірогідність настання небезпечної події та ступеня тяжкості травм від неї з урахуванням часу (рис. 3).

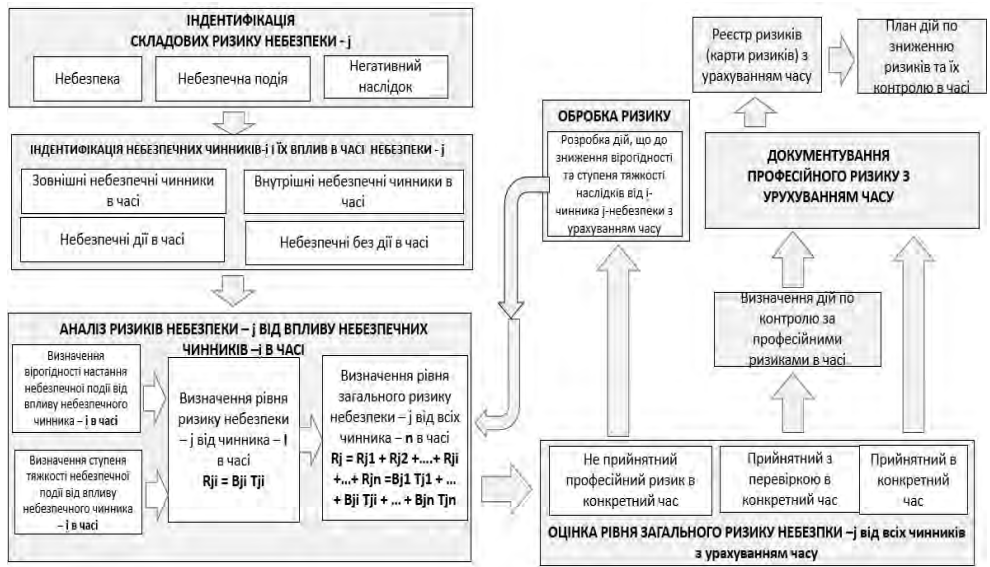


Рис. 3. Процес керування професійними ризиками з урахуванням зміни впливу небезпечних чинників на вірогідність настання небезпечної події та ступеня тяжкості травм від неї з урахуванням часу

П'ятий крок. Відбувається розробка рекомендацій щодо усунення чи зменшення наслідків від дії описаної проблеми, відбувається обґрунтування запобіжних заходів щодо їх усунення.

Результати дослідження

Настання небезпечної події, виникнення ДТП є результатом взаємодії трьох основних складових: наявність загрози чи небезпеки, взаємодія між вантажним автомобілем і людиною і наявність каталізатора. Під каталізатором будемо розуміти певне явище, яке сприяє швидшому розвитку події, що призводять до ДТП.

Неможливе настання ДТП, якщо не існує всіх трьох наведених елементів. Звісно, щоб захистити водія від скоєння ДТП, як правило, найпростіше усунути складову "взаємодія", тобто відмовитись від виконання транспортної роботи з перевезення вантажу. Складніше усунути складову "небезпека", особливо, якщо вона пов'язана з зовнішніми чинниками (погодними умовами, іншими учасниками дорожнього руху, станом доріг та ін.). Однак, найскладніше передбачити складову "каталізатор" (помилку), яка пов'язана з психофізіологічним станом водія, його компетенціями, професіоналізмом, яка може змінюватись з різних причин: настрою, емоційного забарвлення, ергономіки робочого місця, умов праці, добробуту, навантаження, ритму роботи та іншого, що потребує постійного моніторингу. Це вимагає встановлення відповідних взаємозв'язків між ймовірністю і тяжкістю наслідків, щоб відслідкувати відповідні зміни в часі (рис. 4).



Рис. 4. Матриця з оцінки ризиків виникнення небезпечної події

Крім того, важливо оцінити відношення водія до своєї роботи через показник "частота виникнення порушень" (табл. 3). Виділимо найбільш негативні психологічні стани, які можуть збільшити рівень ризику: байдужість, безпорадність, безвідповідальність, помилка, агресивна поведінка.

Таблиця 3. Кількісні показники для оцінки професійних ризиків

Бали	Частота виникнення	Ймовірність події	Тяжкість наслідків
5	Безперервний вплив	Висока ймовірність інциденту більше 80%	Смертельні: смерть особи
4	Частий вплив, виникає кілька разів на день (тиждень)	Значна ймовірність 50–80%	Серйозні: травми голови, хребта – інвалідність
3	Значний вплив, виникає декілька разів на тиждень (місяць)	Помірна ймовірність від 20–50%	Значні: травми кінцівок, значний термін видужання
2	Помірний вплив – декілька разів на місяць	Певна ймовірність 10–20%	Помірні: втрата працездатності до місяця, розтягування м'язів, сухожилів
1	Незначний вплив – відбувається зрідка	Малоймовірний інцидент 2–10%	Незначні: подряпини, садна, забиття, втрата працездатності на декілька днів

Для процесу динамічної оцінки професійних ризиків необхідно побудувати взаємодію між різними елементами транспортної системи (рис. 5), яка дозволяє встановити зміну кожного небезпечного чинника в часі.

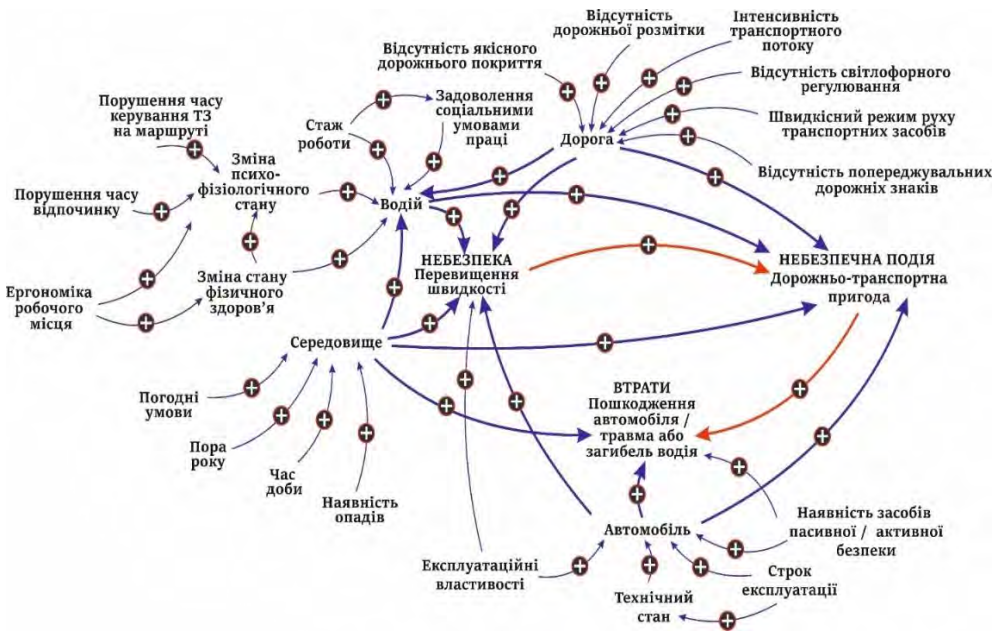


Рис. 5. Динамічна модель оцінки професійного ризику водія

Наступним кроком є визначення величини професійного ризику водія, яка побудована на основі взаємодії ймовірності настання небезпечної події та тяжкості наслідків з урахуванням зміни фізичного і психологічного стану водія, що наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Ідентифікація небезпек, оцінка професійного ризику водія

№	Ідентифікація				Первинний аналіз – визначення впливу небезпечного чинника в часі			Первинна оцінка	
	Небезпека	Небезпечна подія	Негативні наслідки	Небезпечний чинник	Вірогідність настання небезпечної події	Ступінь тяжкості негативних наслідків небезпечної події	Професійний ризик		
влітку									
1	Автомобіль, що рухається	ДТП	Травма або захворювання	Зміна психологічного стану	1	9	9	Прийнятний	
				Зміна фізичного стану	1	9	9	Прийнятний	
				Зміна кліматичних умов	3	2	6	Прийнятний	
				Зміна умов на дорозі	4	4	16	Прийнятний	
				Перевищення швидкості	1	9	9	Прийнятний	
				Технічний стан авто					
				Нерегулярний маршрут					
				Оцінка загального професійного ризику			49	Прийнятний	
взимку									
2	Автомобіль, що рухається	ДТП	Травма або захворювання	Зміна психологічного стану	9	9	81	Неприйнятний	
				Зміна фізичного стану	7	9	63	Неприйнятний	
				Зміна кліматичних умов	4	3	12	Прийнятний	
				Зміна умов на дорозі	7	4	28	Прийнятний	
				Перевищення швидкості	2	9	18	Прийнятний	
				Оцінка загального професійного ризику			202	Неприйнятний	
За годинами доби									
3	Автомобіль, що рухається	ДТП	Травма або захворювання	Зміна фізичного і психологічного стану водія	14.00-18.00	1	9	9	Прийнятний
					18.00-21.00	2	9	18	Прийнятний
					21.00-24.00	3	9	27	Прийнятний
					00.00-3.00	7	9	63	Неприйнятний
					03.00-06.00	9	9	81	Неприйнятний
Оцінка загального професійного ризику				Неприйнятний					
За порою доби									
4	Автомобіль, що рухається	ДТП	Травма або захворювання	Зміна кліматичних умов праці	влітку	1	9	9	Прийнятний
					взимку	2	9	18	Прийнятний
					восени	3	9	27	Прийнятний
					навесні	7	9	63	Неприйнятний
					Оцінка загального професійного ризику				Неприйнятний

Обговорення

Розроблена для використання модель зв'язку небезпечних чинників внутрішнього та зовнішнього середовища організації, пов'язаних з їх

негативним впливом на зростання вірогідності настання небезпечної події (інциденту) та ступеня тяжкості в часі, дозволяє передбачити невідомі стани "каталізатора" (фізичного і психічного стану водія) на основі доступної інформації про якість професійної діяльності. Процес прогнозування пов'язаний з невизначеністю, насамперед, появи небезпечної події через зміну відношення в часі, що дозволяє розглянути різні можливі альтернативні сценарії (можливі сценарії поведінки) для уникнення настання ДТП [14]. Запропонований підхід дозволяє оцінити рівень професійного ризику з урахуванням всіх видів появи цих можливих сценаріїв розвитку подій. При цьому значно посилюється достовірність отриманих результатів аналізу зміни професійних (динамічних) ризиків в часі: за годинами доби, за днями тижня, за сезоном року, на що також звертають увагу автори роботи. Причому відмічається, що сезонна динаміка впливає на економічні показники, ефективність роботи [15].

Вказана особливість запропонованого підходу, що виражається через взаємодію трьох основних складових: наявності загрози чи небезпеки, взаємодії між вантажним автомобілем і людиною, впливу фізичного і психологічного стану водія, дозволяє побудувати матрицю, яка визначає залежність тяжкості наслідків від настання небезпечної події, що є основою динамічної моделі оцінки професійного ризику водія [16]. В свою чергу, такий підхід має ряд переваг над стаціонарними моделями, які не дозволяють врахувати можливість зміни відношення водія в часі, тобто виявити вплив на появу помилки чи, навпаки, уникнення аварійної ситуації. Це, в свою чергу, збільшить невідповідність розрахунків. Припустимо, що існує небезпека «технічно несправний автомобіль» – ймовірність настання ДТП при цьому складає I_2 , тоді з урахуванням позитивного/негативного відношення водіїв до виконання своїх обов'язків ця ймовірність буде дорівнювати $I_2 \pm \Delta$. Δ – це величина ймовірності або уникнення, або навпаки, настання небезпечної події через обережні/невмілі дії водія під час управління автомобілем. Тобто існує якась базова ймовірність виникнення ДТП через технічно несправний автомобіль, величина якої не залежить від людського чинника. В свою чергу, відношення людини до виконання свої обов'язків є додатковим фактором, який або збільшує ймовірність настання ДТП, або навпаки, його зменшить [17]. Так, ймовірність помилки при управлінні автомобілем зменшується через збільшення рівня уваги, зосередженості, відповідальності, що сприяє зменшенню ймовірності небезпеки та готовності водія до різного розвитку подій. З іншого боку, вона може збільшитись через прояв сильних емоцій, появу втоми, наявності ризикованої поведінки, безрозсудність, байдужість, самовпевненість. В такому випадку для розрахунку ймовірності ДТП можна використати формулу Байєса [18]. Наприклад, якщо ймовірність ДТП від технічно несправного автомобіля складає I_1 , а від зробленої помилки водієм – C_1 , то ймовірність настання ДТП від технічно несправного автомобіля за умови, що водій зробить помилку, можна розрахувати як

$$I(I_1 / C_1) = \frac{I(C_1 / I_1) \cdot I(I_1)}{I(C_1)}, \quad (2)$$

де $I(C_1 / I_1)$ – ймовірність настання умовної події при впливі помилки; $I(C_1)$ – ймовірність настання події без впливу помилки.

Отримані оцінки величини професійних ризиків при зазначеному підході потребують постійної перевірки, що дозволяє виконати запропонований алгоритм, в якому передбачено зворотний зв'язок, що пов'язаний зі зміною впливу небезпечних чинників на вірогідність настання небезпечної події та ступеня тяжкості. Причому такий підхід дозволяє розглянути декілька можливих сценаріїв, що значно зменшить невизначеність оцінок.

Висновки

1. Розроблена та рекомендується для використання модель зв'язку небезпечних чинників внутрішнього та зовнішнього середовища організації, пов'язаних з їх негативним впливом на зростання вірогідності настання небезпечної події (інциденту) та ступеня тяжкості в часі.

2. Запропоновано для аналізу зміни професійних (динамічних) ризиків в часі водія вантажного автомобіля, якими є зміна небезпечних чинників: за годинами доби: з 00.00-24.00 години; за днями тижня: понеділок, вівторок, середа, четвер, п'ятниця, субота, неділя; за сезоном року: весна, літо, осінь, зима.

3. Пропонується для визначення ризику настання ДТП враховувати взаємодію трьох основних складових: наявності загрози чи небезпеки, взаємодії між вантажним автомобілем і людиною і наявності каталізатора – фізичний і психологічний стан водія.

4. Розроблено для перевірки адекватності проведених оцінок алгоритм, який дозволяє відслідкувати кожен крок з керування професійними ризиками з урахуванням зміни впливу небезпечних чинників на вірогідність настання небезпечної події та ступеня тяжкості травм від неї з урахуванням часу.

5. Виходячи із взаємодії ймовірності настання небезпечної події та тяжкості наслідків з урахуванням зміни фізичного і психологічного стану водія, побудовано динамічну модель оцінки професійного ризику водія.

6. Встановлено, що неприйнятний рівень ризику фіксується в нічну пору доби та в зимовий час при невідповідних кліматичних умовах, що потребує розробки дієвих запобіжних заходів з безпеки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rasmussen J., Svedung I. Proactive Risk Management in a Dynamic Society. Karlstad, Sweden: Swedish Rescue Services Agency, 2000. 144 p. ISBN: 91-7253-084-7.
2. Cheng G., Cheng R., Zhang S., Sun X. Risk evaluation method for highway roadside accidents. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(1), 1-12. <https://doi.org/10.1177%2F1687814018821743>
3. Kizito Alex, Semwanga A.R. Modeling the Complexity of Road Accidents Prevention: A System Dynamics Approach. *International Journal of System Dynamics Applications*, 2020, 9(2), 24-41. <https://doi.org/10.4018/IJSDA.2020040102>
4. Goh Y.M., Love P.E.D., Stagbouer G., Annesley C. Dynamics of safety performance and culture: A group model building approach. *Accident Analysis and Prevention*, 2012, 48, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.05.010>
5. Zhu, Y.J. (2011) The Basis and Method for Engineering Project Risk Identification. *Modern Enterprise*, 9, 24-25.
6. Xu, G.Q. and Zou, J. (2006) The Method of System Dynamics: Principle, Characteristics and New Development. *Journal of Harbin Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 8, 72-77.

7. Wan J., Liu Y. (2014). A System Dynamics Model for Risk Analysis during Project Construction Process. *Open Journal of Social Sciences*, 2(6), 451-454. <http://dx.doi.org/10.4236/jss.2014.26052>
8. Фердман Г.П. (2020). Деякі пропозиції щодо входження транспортної безпеки України до європейської системи безпеки на транспорті. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Державне управління*, 31(70), №4, 134-139. <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-6468/2020.4/21>
9. Tsopa V., Cheberiachko S., Yavorska O., Deryugin O., Bas I. Increasing the safety of the transport process by minimizing the professional risk of a dump truck driver. *Mining of mineral deposits*, 2022, 16(3), 101-108. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.101>
10. Соловійова О.О., Валько А.М. (2020). Передумови впровадження заходів безпеки в аеропорту. *Наукоємні технології*, 46(3), 407-414. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.47.14939>
11. Yao BZ, Yang CY, Yao JB. Tunnel surrounding rock displacement prediction using support vector machine. *Int J Comput Intell Syst* 2010; 3: 843–852.
12. Yu B, Zhu HB, Cai WJ, et al. Two-phase optimization approach to transit hub location – the case of Dalian. *J Transport Geogr* 2013; 33: 62–71.
13. Цопа В. Базова методологія управління ризиками в системах менеджменту. *Охорона праці*. 2018. 1, С. 18-26.
14. Yao BZ, Hu P, Lu XH, et al. Transit network design based on travel time reliability. *Transport Res C Emerg Tech*. Epub ahead of print January 17, 2014.
15. Yu B, Zhang C, Kong L, et al. System dynamics modeling for the land transportation system in a port city. *SIMULATION*. 2014;90(6):706-716. doi:10.1177/0037549714533619
16. G. Yao, H. Huang, H. Sun, J. Wei and G. Sun, "The whole vehicle system dynamics modeling and simulation for transportation vehicle," 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2010, pp. 698-701, <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5536044>
17. Tavakkolimoghaddam, S., Hadji Molana, S.M., Javadi, M. and Azizi, A. (2022), "System dynamics model for intra-city multimodal transportation considering behavioral indicators and demand under uncertainty conditions", *Journal of Advances in Management Research*, Vol. 19 No. 4, pp. 533-559. <https://doi.org/10.1108/JAMR-07-2021-0249>
18. А.І. Старіков, О.О. Соларьов, М.О. Мікуліна, Н.В. Тарельник, О.В. Таценко, Використання різних підходів до розв'язання логістичних задач, *Вісник Вінницького політехнічного інституту: № 4 (2021)*. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-85-91>

Стаття надійшла до редакції 10.02.2023 і прийнята до друку після рецензування 01.06.2023

REFERENCES

1. Rasmussen, J., & Svedung, I. (2000). *Proactive Risk Management in a Dynamic Society*. Karlstad, Sweden: Swedish Rescue Services Agency. ISBN: 91-7253-084-7.
2. Cheng, G., Cheng, R., Zhang, S., & Sun, X. (2019). Risk evaluation method for highway roadside accidents. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(1), 1-12. <https://doi.org/10.1177%2F1687814018821743>
3. Kizito, A., & Semwanga, A.R. (2020). Modeling the Complexity of Road Accidents Prevention: A System Dynamics Approach. *International Journal of System Dynamics Applications*, 9(2), 24-41. <https://doi.org/10.4018/IJSDA.2020040102>
4. Goh, Y.M., Love, P.E.D., Stagbouer, G., & Annesley, C. (2012). Dynamics of safety performance and culture: A group model building approach. *Accident Analysis and Prevention*, 48, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.05.010>
5. Zhu, Y.J. (2011). The Basis and Method for Engineering Project Risk Identification. *Modern Enterprise*, 9, 24-25.

6. Xu, G.Q. & Zou, J. (2006). The Method of System Dynamics: Principle, Characteristics and New Development. *Journal of Harbin Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 8, 72-77.
7. Wan, J., & Liu, Y. (2014). A System Dynamics Model for Risk Analysis during Project Construction Process. *Open Journal of Social Sciences*, 2(6), 451-454. <http://dx.doi.org/10.4236/jss.2014.26052>
8. Ferdman, G.P. (2020). Some proposals for the accession of Ukraine's transport security to the European transport security system. *Journal Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University*, series «Public Management and Administration», 31(70), №4, 134-139 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-6468/2020.4/21>
9. Tsopa, V., Cheberiyachko, S., Yavorska, O., Deryugin, O., & Bas, I. (2022). Increasing the safety of the transport process by minimizing the professional risk of a dump truck driver. *Mining of mineral deposits*, 16(3), 101-108. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.101>
10. Soloviova, O., & Valko, A. (2020). Prerequisites for implementing security measures at the airport. *Science-based technologies*, 46(3), 407-414 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.47.14939>
11. Yao, BZ, Yang, CY, & Yao, JB. (2010). Tunnel surrounding rock displacement prediction using support vector machine. *Int J Comput Intell Syst*, 3, 843-852.
12. Yu, B, Zhu, HB, Cai, WJ, et al. (2013). Two-phase optimization approach to transit hub location – the case of Dalian. *J Transport Geogr*, 33, 62-71.
13. Tsopa, V. (2018). Basic methodology of risk management in management systems. *Okhorona pratsi*, 1, 18-26 [in Ukrainian].
14. Yao, BZ, Hu, P, Lu, XH, et al. (2014). Transit network design based on travel time reliability. *Transport Res C Emerg Tech*.
15. Yu, B, Zhang, C, Kong, L, et al. (2014). System dynamics modeling for the land transportation system in a port city. *SIMULATION*, 90(6), 706-716. <https://doi.org/10.1177/0037549714533619>
16. Yao, G., Huang, H., Sun, H., Wei, J. & Sun, G. (2010). The whole vehicle system dynamics modeling and simulation for transportation vehicle. In *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering* (pp. 698-701). <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5536044>
17. Tavakkolmoghadam, S., Hadji Molana, S.M., Javadi, M. & Azizi, A. (2022). System dynamics model for intra-city multimodal transportation considering behavioral indicators and demand under uncertainty conditions. *Journal of Advances in Management Research*, 19(4), 533-559. <https://doi.org/10.1108/JAMR-07-2021-0249>
18. Starikov, A.I., Solarov, O.O., Mikulina, M.O., Tarelnyk, N.V. & Tatsenko, O.V. (2021). Using Different Approaches to Solving Logistics Tasks. *Visnyk VPI*, 4, 85-91 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-85-91>

The article was received 10.02.2023 and was accepted after revision 01.06.2023

Цопа Віталій Андрійович

доктор технічних наук, професор кафедри менеджменту, Міжнародний інститут менеджменту

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

ORCID ID: 0000-0002-4811-3712 **e-mail:** dr.tsopav@gmail.com

Чеберячко Сергій Іванович

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

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

ORCID ID: 0000-0001-7307-1553 **e-mail:** cheberiyachkoyi@ukr.net

Яворська Олена Олександрівна

канд. техн. наук, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

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

ORCID ID: 0000-0001-5516-5310 **e-mail:** elenayavorska80@gmail.com

Негрій Тетяна Олександрівна

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

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

ORCID ID: 0000-0002-4239-3178 **e-mail:** tetiana.nehrii@gmail.com

Ткаченко Тетяна Миколаївна

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

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

ORCID ID: 0000-0002-6215-3438 **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

Дерюгін Олег Валентинович

канд. техн. наук, доцент кафедри управління на транспорті, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

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

ORCID ID: 0000-0002-2456-7664 **e-mail:** deryugin_o@ukr.net

УДК 621.10.56

Olga Chenchewa, PhD, Associated professor
ORCID ID: 0000-0002-5691-7884 *e-mail*: chenchevaolga@gmail.com

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

ANALYSIS OF THE FRACTIONAL COMPOSITION OF THE DUST OF THE WORKING AREA WHEN DRILLING COMPOSITE MATERIALS BASED ON CARBON FIBERS

***Abstract.** Modern production of unmanned aerial vehicles is characterized by the use of high-tech materials based on carbon fibers, the assembly operations of which are characterized by a large number of mechanical drilling operations, which are performed mainly by hand using a carbide tool with a diamond coating. The paper presents a study of the concentrations and dispersion of the dust composition and the geometric shape of the dust-forming particles in the working space of workers of machining shops during the technological operations of drilling, milling and countersinking of packages of composite materials based on carbon polyacrylonitrile fibers. On the basis of the conducted experiments, the regularities of the distribution of dust of different fractions in the horizontal and vertical planes of the working space at a distance covering the zone of the immediate location of the worker during this type of operation were determined. The obtained data made it possible to record a significant excess of the maximum allowable concentrations of finely dispersed residues of polyacrylonitrile fibers in the working area of the drill, 2.5 and 10 μm in size and elements of the carbon matrix. In order to investigate the possibility of a negative impact of the dust of the working area on the body of the worker, a study of the fractionation and geometric shape of carbon fiber fragments was performed using raster microscopy, based on which it was concluded that the fiber fragments have a spear-shaped, pointed shape, and the carbon matrix forms conglomerates, which are characterized sharp edges and can cause significant damage when they affect the human respiratory system. On the basis of the obtained results, recommendations were given in the work to improve the indicators of the dust load of workers to normalized values with the help of the use of special suction devices and personal protective equipment with special filters.*

***Key words:** dust fraction; dust load; working area; dispersed composition; mechanical processing; occupational health.*

О.О. Ченчева

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
м. Кременчук, Україна

АНАЛІЗ ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ ПИЛУ РОБОЧОЇ ЗОНИ ПРИ СВЕРДЛУВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ КАРБОНОВИХ ВОЛОКОН

***Анотація.** Сучасне виробництво безпілотних літальних апаратів характеризується використанням високотехнологічних матеріалів на основі карбонових волокон, збиральні операції яких характеризуються великою кількістю механічних операцій свердлування, які виконуються переважно вручну із використанням твердосплавного інструмента з алмазним покриттям. В роботі представлено дослідження концентрацій та*

дисперсності пилового складу та геометричної форми пилоутворюючих частинок у робочому просторі працівників механообробних цехів при виконанні технологічних операцій свердлування, фрезерування та зенкерування пакетів композиційних матеріалів на основі карбонових поліакрилонітрильних волокон. На основі проведених експериментів було визначено закономірності розповсюдження пилу різної фракції у горизонтальних та вертикальних площинах робочого простору на відстані, що охоплює зону безпосереднього розташування робітника під час виконання такого типу операцій. Отримані дані дозволили зафіксувати значне перевищення гранично допустимих концентрацій дрібнодисперсних залишків поліакрилонітрильних волокон у робочій зоні свердлувальника, розміром 2,5 та 10 мкм, та елементів карбонової матриці. З метою дослідження можливості негативного впливу пилу робочої зони на організм працівника було виконано дослідження фракційності та геометричної форми уламків карбонових волокон за допомогою растрової мікроскопії, на основі чого було зроблено висновок, що уламки волокон мають списовидну гостроконечну форму, а карбонова матриця утворює конгломерати, які характеризуються гострими гранями і здатні завдавати значної шкоди при їх впливі на дихальну систему людини. На основі отриманих результатів в роботі було надано рекомендації щодо покращення показників пилового навантаження працівників до унормованих значень за допомогою використання спеціальних відсмоктувальних пристроїв та засобів індивідуального захисту зі спеціальними фільтрами.

Ключові слова: фракція пилу; пилонавантаження; робоча зона; дисперсний склад; механічна обробка.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.100-108>

Вступ

Сучасна безпекова ситуація в Україні стала причиною розвитку виробництва сучасних легких літальних апаратів, основою конструкцій яких є сучасні високотехнологічні, надміцні композиційні матеріали на основі карбонових волокон.

Збір елементів літальних апаратів (ЛА) і з'єднання окремих шарів конструкційних матеріалів виконують за допомогою з'єднань, від точності виконання яких залежить якість і довговічність конструкції в цілому. Саме тому прецензійність виконання отворів для такого типу конструкцій є найважливішою характеристикою якості обробки елементів. В реальному збиральному процесі виробництва ЛА основними технологічними процесами, які здатні забезпечити вимоги до якості обробки та чистоти робочого місця, є обробка осьовим інструментом та спіральне фрезерування.

У випадках виконання отворів у дрібних деталях та елементах складної геометричної форми, а також у важкодоступних місцях використовують портативний ручний інструмент з можливістю регулювання подачі в залежності від типу карбонвмісного матеріалу, діаметра свердла, а також з можливістю реалізації автоматичного підводу і виводу свердла із зони різання та контролем глибини свердління та перевантаження інструмента.

Стан питання

Виконання отворів у пакетах композиційних матеріалів на основі карбонових волокон характеризується значним виділенням дрібнодисперсного пилу і

шламу із зони різання, що особливо проявляється при обробці матеріалів на основі пірвуглецевої матриці, що свідчить про загрозу здоров'ю працюючих, оскільки дія пилу на організм носить накопичувальний характер.

Нормування та оцінка впливу на здоров'я працюючих дрібнодисперсних твердих частинок, присутніх у повітрі робочої зони механообробних цехів, залишається актуальною проблемою, оскільки пиловий фактор характерний для багатьох виробництв [1]. Цілим рядом досліджень встановлено, що особливу небезпеку становлять респірабельні (діаметром до 5 мкм) та трахеобронхіальні (діаметром від 5 до 10 мкм) дрібнодисперсні часточки [2]. При цьому гігієнічні нормативи на зважені частки розмірами менше 10 мкм (PM10) та 2,5 мкм (PM2,5) у повітрі робочої зони мають бути унормовані та відповідати державним та міжнародним стандартам. Визначення параметрів розподілу концентрацій є важливим для оцінки та дослідження пневмоконіознебезпечності робочих місць. Дуже важкою проблемою пилового моніторингу є визначення дисперсного складу частинок, що витають у повітрі та вдихаються людиною.

Вкрай недостатніми є фрагментарні дані про частку дрібних фракцій у загальній масі пилових частинок у повітрі робочої зони. Важливою при аналізі впливу карбонового пилу є інформація про форму частинок, оскільки дрібні часточки карбонових волокон з гострими гранями, особливо голчастої форми (кристалічний пил, нанотрубки, порошинки карбонового волокна і т. п.), надають більшу подразнювальну дію в місці зіткнення (на слизових оболонках очей, верхніх дихальних шляхів, а іноді і на шкірному покриві), тоді як аморфний і волокнистий пил меншою мірою викликає місцеве подразнення тощо [3].

Мета роботи – дослідження дисперсного складу пилу механообробних цехів виробництв ЛА, визначення геометричної форми пилового шламу та оцінка коректності класифікації пилу як характеристик робочих місць робітників.

Виклад основного матеріалу

Оброблюванню твердосплавним свердлом піддавали високоміцний термостійкий композиційний матеріал на основі поліакрилонітрильних карбонових волокон 3D укладання, просочених пірвуглецевою матрицею, на основі високотемпературного спікання. Структура карбон-карбонового композиту наведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура карбонвмісного композиційного матеріалу на основі поліакрилонітрильних волокон

Дослідження дисперсного складу та геометричної форми пилових викидів виконувались на прикладі виконання отворів у карбон-карбоновому композиті твердосплавним свердлом діаметром $d = 8 \text{ mm}$ за допомогою ручного інструмента з постійною подачею [4].

Пробовідбір пилу здійснювався на робочих місцях у безпосередній близькості до джерел виділення (від 10 до 50 см від місця пилоутворення). При відборі застосовувалися пристрої, що дозволяють досліджувати фракційний склад пилу. Тривалість відбору проб становила від 2 до 10 хв (залежно від інтенсивності виділення пилу на джерелі виділення) зі швидкістю $20 \text{ dm}^3/\text{хв}$.

Вимірювання глибини свердлування було виконано за допомогою нутроміра PROTETER 5336-160.

Визначення дисперсного складу пилових викидів здійснювали із застосуванням SDS011 сенсорів пилу PM2.5 та PM10 (охоплюваний діапазон розміру частинок від 2,5 мкм до 10 мкм), які було розташовано у вертикальній і горизонтальній площинах робочого місця, на відстані від 10 до 50 см від місця врзання свердла в оброблюваний композит. На підставі результатів, отриманих при визначенні дисперсного складу, визначалася концентрація дрібнодисперсних карбонових частинок у повітрі PM2.5 і PM10.

Для мікроскопічного аналізу пилу з метою встановлення геометричної форми частинок використано растровий електронний мікроскоп PEM-3-I на базі Науково-дослідного центру обробки матеріалів потужними енергетичними потоками Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

При характеристиці робочих місць свердлувальників та фрезерувальників урахування значної частки дрібнодисперсного пилу є обов'язковим, особливо при здійсненні обробки композиційних матеріалів на основі поліакрилонітрильних карбонових волокон [5].

Для конкретного виду виробничого пилу при обробці карбонвмісних композиційних матеріалів отримали гістограми, що дозволяють оцінити весь спектр частинок різного розміру та їх концентрації на різних відстанях від джерела виконання отворів та глибини заглиблення інструмента у матеріал (рис. 2).

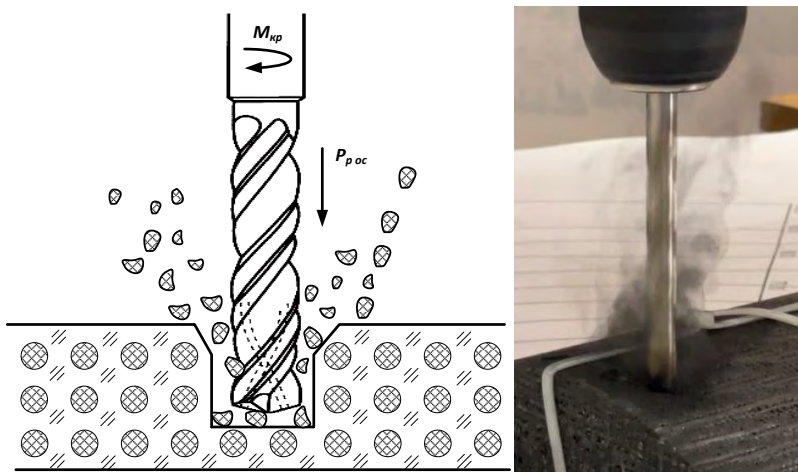


Рис. 2. Схема пилоутворення при свердлуванні карбон-карбонового композиту марки на основі поліакрилонітрильних волокон

Величина фракції пилу, який вдихається свердлувальником, залежить від швидкості та напрямку руху повітря, від частоти дихання та інших факторів. Визнається, що при відборі проби вдихається фракція тільки тих частинок, що містяться в повітрі та знаходяться в зоні дихання. Саме тому дослідження концентрації пилу у робочій зоні здійснювалося на відстані від 10 до 50 см від місця виконання отвору як по горизонтальній поверхні розповсюдження, так і по вертикальній. Такий підхід дозволяє отримати узагальнений показник пилового навантаження, який здатен враховувати турбулентність пилових мас при їх виведенні із зони різання у канавках свердла та при виконанні свердлування за допомогою дискретної циклічної подачі інструмента, що пришвидшує процес руйнування матеріалу та швидкості його обробки.

Розподіл концентрацій пилу наведено на діаграмах (рис. 3–5).

Початковий пиловий фон до обробки становив 11–12 мг/м³.

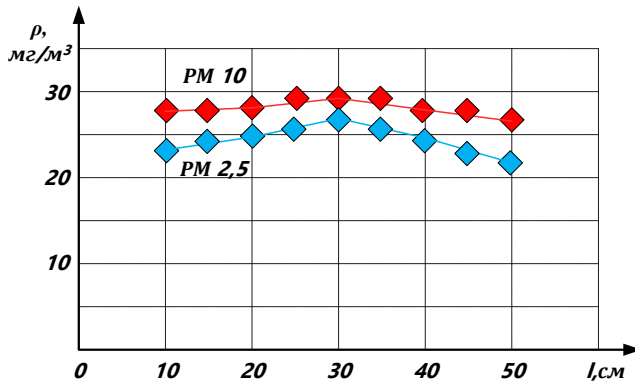


Рис. 3. Концентрація пилових частинок різної фракції у робочому просторі горизонтальної площини від відстані до врізання у матеріал

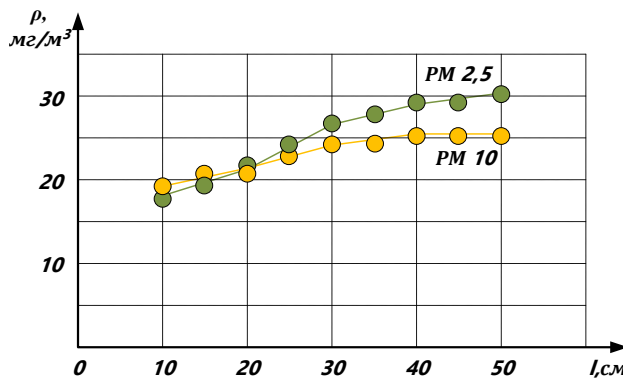


Рис. 4. Концентрація пилових частинок різної фракції у робочому просторі вертикальної площини від відстані до врізання у матеріал

З представлених графіків очевидно, що дисперсний склад пилу досить різномірний. При виконанні технологічних операцій механічної обробки конструкційних отворів у пакетах карбонвмісних композиційних матеріалів, пов'язаних зі шліфуванням, свердлінням, зенкеруванням, розточуванням

отворів, нарізуванням різьблення, обточуванням торців і циліндричних поверхонь та ін., спостерігається виділення у повітря робочої зони значної кількості дрібнодисперсного пилу (P) від 50 до 70% загальної маси твердих частинок.

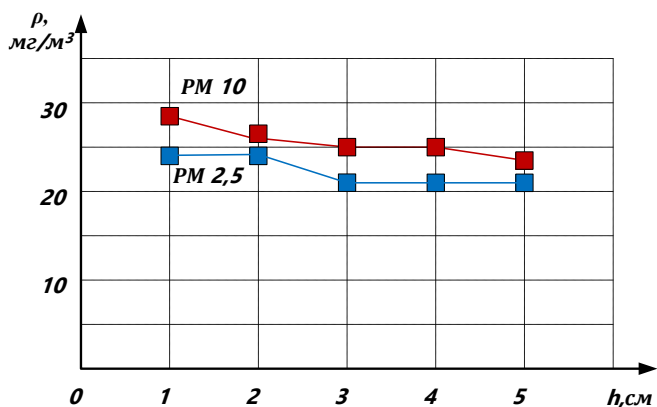


Рис. 5. Концентрація пилових частинок різної фракції у робочому просторі від глибини різання в матеріалі

Для цих же технологічних операцій характерна і наявність у загальній масі частинок найтоншого пилу (PM_{2,5}; PM₁₀), який може довго знаходитися в повітрі, поширюючись з конвективними потоками повітря по всій робочій зоні. Частка частинок пилу з діаметром менше 2,5 мкм під час проведення робітниками операцій з механічної обробки карбонових деталей становить у середньому 16–17%.

Як видно з наведених гістограм, рівень підвищення пилового навантаження при обробці карбонового композиту зріс вдвічі в радіусі робочої зони свердлувальника. При цьому більшість продуктів свердління, які виносяться із зони різання у жолобі твердосплавного свердла та розповсюджуються у повітряному просторі робочої зони під дією відцентрових сил при його обертанні, містять залишки пірвуглецевої матриці та залишки поліакрилонітрильних волокон, що підтверджують результати растрової мікроскопії пилу. Згідно з [6], ГДК таких елементів у повітрі не має перевищувати 2–4 мг/м³. Отримані результати дозволяють стверджувати про значне перевищення гігієнічних регламентів хімічних речовин у повітрі робочої зони при свердлуванні карбон-карбонових композитів.

З метою дослідження форми, складу та розмірів частинок осадженого пилу, який виділяється при обробці карбонових композиційних матеріалів, за допомогою растрового мікроскопу на струмопровідну підложку було нанесено шар осадженого пилу. Слід зазначити, що при мікроскопуванні пилу в результаті механічної обробки карбон-карбонових композитів твердосплавним свердлом були ідентифіковані пилові частинки діаметром менше 0,01 мкм (менше 100 нм), тобто частки нанорозмірного діапазону. Окрім викришування пірвуглецевої матриці, при виконанні свердлувальних операцій в складі осадженого пилу були виявлені залишки вуглецевих волокон та навіть агломерати вуглецевих пучків, які мають списоподібну геометричну форму до 70% від загального складу пилу. Гігієнічні наслідки впливу таких

частинок вивчені слабо, що потребує детальної уваги до якості повітря робочої зони під час операцій механічної обробки та виконання отворів при зборі літальних апаратів на основі карбонових композиційних матеріалів.

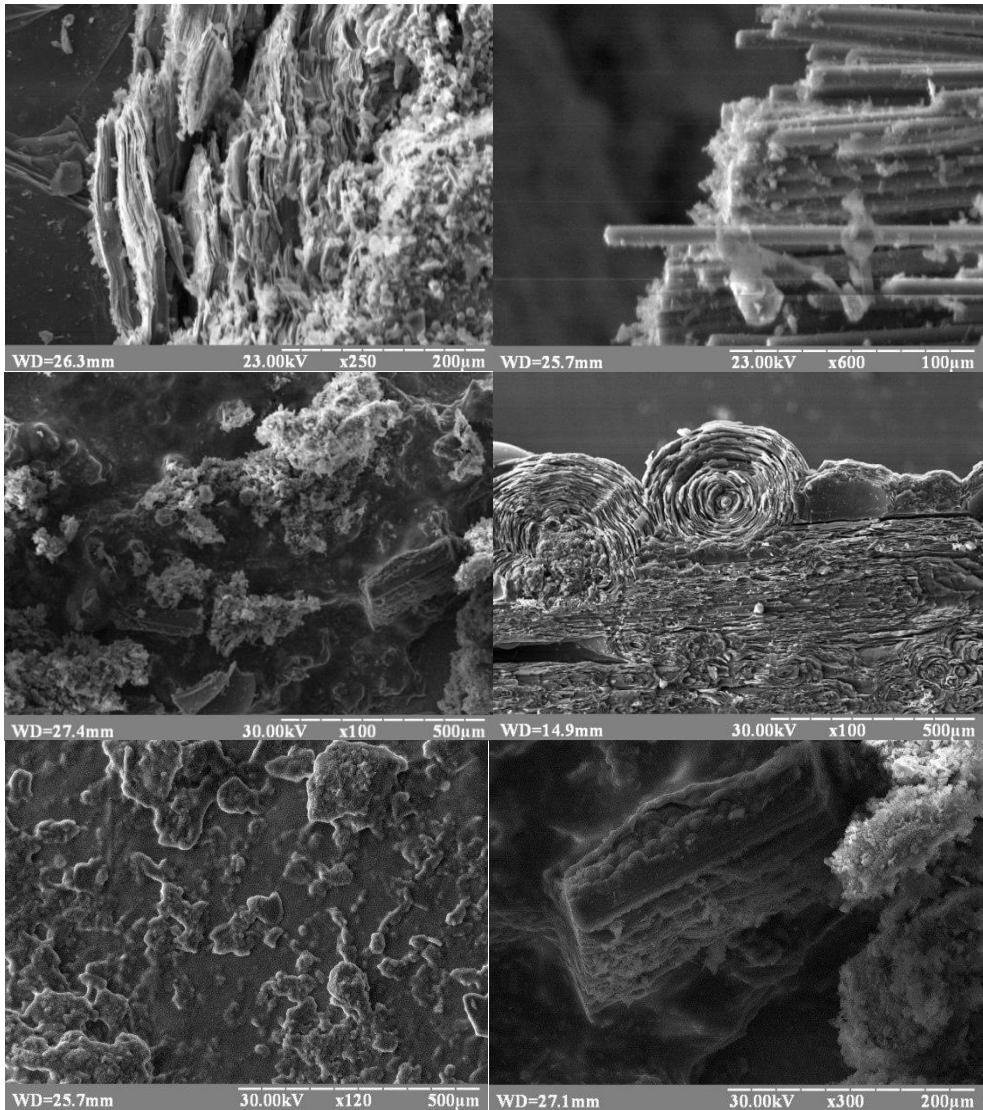


Рис. 5. Мікрофотографії осадженого пилу в результаті обробки карбонвмісних матеріалів, отримані за допомогою РЕМ-30-І

Під час аналізу пилу після обробки отворів алмазним інструментом було встановлено, що у складі пилових частинок, крім матеріалів карбонових композитів (залишки поліакрилонітрильних волокон та пірвуглецевої матриці), містяться сполуки заліза, кремнію, хрому, молібдену та залишків корунду, що вимагають подальшого детального аналізу персональної експозиції працюючих з важкими металами, що містяться в пилових частках.

В цілому отримані дані свідчать про необхідність детального контролю за пиловим складом робочої зони працівників механооброблювальних цехів, які

виконують безпосередню високоточну обробку отворів у пакетах композиційних матеріалів на основі карбонових волокон та пірвуглецевої матриці, використання засобів індивідуального захисту органів зору і дихання з фільтрами, які здатні затримувати карбоновий пи́л розмірами до 2,5 мкм, та використання мобільних засобів автоматичного видалення пи́лу з робочої зони обробки.

Висновки

1. Фракційний та компонентний склад пилового забруднення робочої зони при механічній обробці карбонових композитів часто не відповідає класифікації, що використовується при характеристиці робочих місць.

2. Пилове забруднення повітря робочої зони свердлувальників композиційних матеріалів на основі карбонових волокон характеризується значною часткою дрібнодисперсних частинок, які значно перевищують допустимий регламент ГДК таких речовин у повітряному просторі робочої зони, що свідчить про загрозу для здоров'я працюючих.

3. Для деяких технологічних процесів встановлено присутність у пи́лу, що потрапляє у робочу зону, наночастинок, гігієнічна характеристика яких вивчена слабо.

4. Отримані дані підтверджують актуальність встановлення дисперсного та компонентного складу пилового забруднення повітря робочих місць для коректної оцінки персональної експозиції працюючих та гігієнічної характеристики умов праці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Н.К. Пятниця-Горпиненко. Сучасний стан проблеми оцінки якості повітря робочої зони, *Environment and Health*, №2, 2015, С. 24–26.
2. Wahyu Susihono, I Putu Gede Adiatmikab, Assessment of inhaled dust by workers and suspended dust for pollution control change and ergonomic intervention in metal casting industry: A cross-sectional study, *Heliyon*. 2020 May; 6(5), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04067>
3. V. Azarov, M. Trokhimchuk, O. Sidelnikova, Research of Dust Content in the Earthworks Working Area, *Procedia Engineering*, Volume 150, 2016, Pages 2008–2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.282>
4. Ченчева, О. О., Бурдейна, Н. Б., Лашко, Є. Є., Шевченко, В. Г., Петренко І. С. (2022). Вплив пилоутворення при механічному обробленні карбон-карбонових композитів на ризик виникнення професійних захворювань. *Проблеми охорони праці в Україні*, 38(3–4), 25–33.
5. Salenko, A., Chencheva, O., Glukhova, V., Shchetynin, V., Budar, M. R. F., Klimenko, S., & Lashko, E. (2020). Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1 (105)), 38–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203279>
6. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».

Стаття надійшла до редакції 06.02.2023 і прийнята до друку після рецензування 17.05.2023

REFERENCES

1. Pyatnytsia-Gorpynenko, N. (2015). The current state of the problem of air quality assessment of the working area. *Environment and Health*, 2, 24-26 [in Ukrainian].
2. Wahyu Susihonoa, I Putu Gede Adiatmikab. (2020). Assessment of inhaled dust by workers and suspended dust for pollution control change and ergonomic intervention in metal casting industry: A cross-sectional study. *Heliyon*. 2020 May; 6(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04067>
3. Azarov, V., Trokhimchyk, M., & Sidelnikova, O. (2016). Research of Dust Content in the Earthworks Working Area. *Procedia Engineering*, 150, 2008-2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.282>
4. Chenchewa, O., Burdeyna, N., Lashko, E., Shevchenko, V., & Petrenko, I. (2022). The impact of dust formation during mechanical processing of carbon-carbon composites on the risk of occupational diseases. *Problems of labor protection in Ukraine*, 38(3-4), 25-33 [in Ukrainian].
5. Salenko, A., Chenchewa, O., Glukhova, V., Shchetynin, V., Budar, M. R. F., Klimenko, S., & Lashko, E. (2020). Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1 (105), 38-51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203279>
6. Order of the Ministry of health of Ukraine dated July 14, 2020 No. 1596 "On the approval of hygienic regulations for the permissible content of chemical and biological substances in the air of the working area."

The article was received 06.02.2023 and was accepted after revision 17.05.2023

Ченчева Ольга Олександрівна

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

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

ORCID ID: 0000-0002-5691-7884 **e-mail:** chenchevaolga@gmail.com

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 004.5:004.6:007.51 355.588.3

Oleksandr Nesterenko¹, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Head of the Department of Information Technologies
ORCID ID: 0000-0001-5329-889X *e-mail*: oleksandr_nesterenko@ieu.edu.ua

Valery Polischuk², Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6991-0617 *e-mail*: valery.polischuk@ukr.net

Volodymir Khyzhniak³, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Aviation and Aviation Search and Rescue
ORCID ID: 0000-0003-0437-749X *e-mail*: ndc.avia@gmail.com

Viktor Shevchenko³, Candidate of Military Sciences, Associate Professor
ORCID ID: 0000-0002-8360-0217 *e-mail*: vikleon.shevchenko@gmail.com

¹International European University, Kyiv, Ukraine

²Ukrainian Scientific Center for Development of Information Technologies, Kyiv, Ukraine

³Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Kyiv, Ukraine

DECISION-MAKING INFORMATION TECHNOLOGIES FOR THE RESOURCES DETERMINATION OF FOREST FIRE EXTINGUISHING BY AVIATION

***Abstract.** The article proposes a solution to the scientific and applied problem of decision support automation in case of determined resource provision of civil defense forces for extinguishing forest fires. This topic is of great relevance both in peacetime and in the conditions of the current armed aggression of the Russian Federation against Ukraine. The solved task is an important element of resolution the more complex problem of prompt response to emergency situations in the ecological and technogenic spheres. To solve this problem, a software environment for automated decision-making support by experts is proposed based on the integration method, which provides structuring of data, support of expert judgments, and visualization of decision-making processes. The functionality of this software environment is considered on the example of the use of the integration expert method and relevant information technologies to determine the resources of aviation groups for the purpose of forming a plan of operational response to the elimination of forest fires. A hierarchical model of the problem is given in accordance with AHP requirements. Also, in order to increase the effect of the conducted modeling and ranking of alternatives, the use of a network model of the problem and ANP*

application (which is a AHP development) to support decision-making are proposed. The ANP implementation is illustrated using the freely distributed SuperDecisions software. The developed scientific and practical approaches and toolkit are intended for functioning in operational units of the state service for emergency situations, but they can also be used in other power structures. The obtained results are aimed at increasing the level of environmental safety in forest areas and can be used to support nature management in different regions.

Keywords: AHP; ANP; acceptable vote; visualization; graphs; ecological safety.

О.В. Нестеренко¹, В.Б. Поліщук², В.В. Хижняк³, В.Л. Шевченко³

¹Міжнародний європейський університет, м. Київ, Україна

²Державне підприємство «Український науковий центр розвитку інформаційних технологій», м. Київ, Україна

³Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, м. Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ РЕСУРСІВ ДЛЯ ГАСІННЯ ЛІСОВОЇ ПОЖЕЖИ ЗАСОБАМИ АВІАЦІЇ

Анотація. В статті пропонується вирішення науково-прикладної задачі автоматизації підтримки прийняття рішень щодо визначення ресурсного забезпечення сил цивільного захисту при гасінні лісових пожеж. Дана тематика має значну актуальність як для мирного часу, так і в умовах поточної збройної агресії Російської Федерації проти України. Розв'язана задача є важливим елементом вирішення більш комплексної проблеми оперативного реагування на надзвичайні ситуації в екологічній та техногенній сферах. Для вирішення даної задачі запропоноване програмне середовище автоматизованої підтримки прийняття рішень експертами на основі інтеграційного методу, що забезпечує структурування даних, підтримку експертних суджень та візуалізацію процесів прийняття рішень. Функціональність цього програмного середовища розглянуто на прикладі використання інтеграційного експертного методу та відповідних інформаційних технологій для визначення ресурсів авіаційних угруповань з метою формування плану оперативного реагування на ліквідацію лісових пожеж. Наведено ієрархічну модель задачі у відповідності до вимог методу аналізу ієрархій. Також для підвищення ефекту від проведених моделювання та ранжування альтернатив запропоновано використання мережевої моделі задачі та застосування для підтримки прийняття рішень методу аналітичних мереж, який є розвитком методу аналізу ієрархій. Реалізація методу аналітичних мереж проілюстрована з використанням СППР SuperDecisions, що вільно розповсюджується. Розроблені науково-практичні підходи та інструментарій призначені для функціонування в оперативних підрозділах державної служби з надзвичайних ситуацій, однак можуть застосовуватись й в інших силових структурах. Отримані результати спрямовані на підвищення рівня екологічної безпеки в лісових ареалах та можуть бути використані для підтримки природокористування в різних регіонах.

Ключові слова: метод аналізу ієрархій; метод аналітичних мереж; схвальне голосування; візуалізація; графи; екологічна безпека.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.109-123>

Вступ

Одним з проблемних питань у сфері реагування на надзвичайні ситуації (НС) є пошук раціональних рішень щодо визначення і планування відповідних ресурсів для оснащення ними аварійних формувань з метою забезпечення необхідних спроможностей [1]. Особливо це стосується ліквідації лісових пожеж (ЛП), які останнім часом являють найбільшу небезпеку в природних екосистемах і є одними з викликів 21 століття [2].

Сучасним ефективним способом гасіння ЛП є залучення авіації, яке передбачає скидання рідини з повітряних суден (ПС) на охоплені вогнем ділянки. Успіх у гасінні ЛП суттєво пов'язаний з наданням у розпорядження необхідної кількості ресурсів (літаків та вертольотів) та вибором «найкращого» варіанта дій авіації при формуванні полоси локалізації пожежі. Для визначення такого варіанта необхідно враховувати значну кількість чинників, а саме місцевість (гірська, рівнинна), характер пожежі, вид та інтенсивність пожежі, площу охоплення пожежею, конфігурацію палаючої крайки, висоту полум'я, задимленість, метеорологічні умови виконання польотних завдань та ін., а також наявний склад авіаційних засобів, аеродроми їх базування, розміщення водоймищ забору води та ін. Необхідно також зазначити, що дії ПС при гасінні пов'язані зі значним рівнем ризику небезпеки, адже ЛП супроводжуються високою температурою горіння, інтенсивною турбулентністю повітря та задимленням [3].

Таким чином, з метою розрахунку сил і засобів для ліквідації ЛП, розроблення та доведення до учасників гасіння планової таблиці польотів ПС в район ЛП керівник гасіння повинен оперувати значеннями багатьох різноманітних даних задля вибору альтернатив складу повітряних суден та способів їх застосування. Це завдання представляє собою багатокритеріальну задачу з множиною альтернатив, а сам процес прийняття рішення супроводжується проходженням великих інформаційних потоків, яким притаманна значна чисельність аспектів/властивостей, що впливають на якість прийнятого рішення. В сучасних умовах розвитку технологій процес вибору раціонального варіанта складу і структури ресурсів зазвичай передбачає використання відповідного аналітичного інструментарію, що забезпечує моделювання різних варіантів сценаріїв розвитку надзвичайної ситуації (НС) та визначення основних завдань, виконання яких гарантуватиме ліквідацію наслідків НС.

Огляд літератури

Кризові події та стихійні лиха останніх років підкреслюють той факт, що прийняття рішень для управління залишається викликом для менеджерів. Незважаючи на те, що за останнє десятиліття з'явилися нові та інноваційні методи збору даних та їх аналізу, поширення застосування штучного інтелекту та сучасних засобів комунікацій, які все частіше використовуються на всіх етапах управління ризиками стихійних лих, проте між науковими дослідженнями, оперативним цивільним захистом і підтримкою прийняття рішень все ще існують розриви [4].

Для подолання цих невідповідностей дослідники та фахівці пропонують низку підходів до підтримки прийняття рішень у багатокритеріальному

середовищі, зокрема спираючись на евристичні інтерактивні та експертні методи. В роботі [5] представлено методологію, розроблену для оцінки ризиків і наслідків на ранніх стадіях надзвичайних екологічних ситуацій для підтримки цивільного захисту країн Європейського Союзу. Зважається на те, що здатність швидко оцінити потенційні ризики і наслідки НС має першочергове значення, однак зібрати необхідні докази на ранніх стадіях НС є серйозною проблемою. У цій статті запропоновано онлайн-інструмент швидкої оцінки ризиків і наслідків для сприяння поглибленій співпраці між експертами, які працюють віддалено, враховуючи вплив катастрофи на навколишнє середовище.

Для забезпечення підтримки прийняття рішень автори пропонують різноманітні підходи до моделювання НС. В роботі [6] розглядається проблема прийняття рішень щодо планування гасіння лісових пожеж в умовах обмежених ресурсів на основі цілочисельної моделі лінійного програмування та нечіткої логіки. В статті [7] представлено оптимізаційну модель збалансованого транспортування для вибору аеродрому як бази для літальних апаратів, які експлуатуються для гасіння природних і лісових пожеж.

Серед методів підтримки прийняття рішень в надзвичайних умовах, які характеризуються високою складністю та внутрішньою невизначеністю, значного поширення знайшов експертний метод аналізу ієрархій (МАІ), за зарубіжною літературою відомий як АНР (Analytic Hierarchy Process). У статті [8] зазначається, що величезна кількість інформації, пов'язаної з управлінням, зазвичай доступна у формі експертних знань і може бути цінним джерелом для підвищення ефективності процесів прийняття рішень. Тому запропоновано використання МАІ для інтеграції як наукових, так і експертних знань у процес прийняття рішень для ранжування найбільш підходящих заходів для боротьби з аварійними ситуаціями, а також для явного включення деяких критеріїв, які є дуже актуальними під час криз, але часто їх важко враховувати. У дослідженні [9] звертається увага, що для управління природними ресурсами корисним для надання рішень є багатокритеріальний аналіз рішень. На прикладі оцінювання такого ресурсу, як каштановий ліс, застосовуються методології A'WOT та SWOT-аналізу, де об'єктива кількісна оцінка параметрів здійснюється за допомогою МАІ. Також у статті [10] з використанням МАІ досліджується просторовий багатокритеріальний аналіз рішень на основі як кількісних даних, так і експертних оцінок, щоб мати можливість ідентифікувати місця, де активи знаходяться під найбільшим ризиком через можливість бути постраждалими від лісових пожеж.

Серед засобів підтримки прийняття рішень набуває значної популярності візуалізація процесів та даних. Візуалізації досліджуються різними способами, починаючи від опрацювання основних принципів створення візуалізацій до вивчення когнітивних процесів, що лежать в основі їх використання [11]. Візуалізація має неабияке значення особливо при прийнятті групових рішень, коли двоє або більше експертів мають колективно зробити вибір з конкуруючого набору альтернатив на основі власних індивідуальних уподобань. У таких ситуаціях експертам може бути корисним моделювання та візуальне порівнювання своїх уподобань з іншими, щоб краще зрозуміти точки зору один одного. У статті [12] прототип, що пропонується авторами, у режимі порівняння альтернатив відображає графік паралельних координат, який демонструє переваги експертів. При перемиканні в режим порівняння

оцінювачів (експертів) натомість відображається діаграма. Для аналізу великих наборів даних «на льоту» використовуються теплові карти, що влаштовані у вигляді сітки як табличні гістограми з колірною позначкою.

Для служб цивільного захисту та інших служб реагування, що розгортають ресурси на місцях, виняткову вагу має візуалізація на основі картографування, зокрема для визначення зон з суттєвим ризиком виникнення кількох одночасних небезпек, наприклад пожежної небезпеки та теплового стресу. В статті [13] представлено використання просторових шарів, які відображають сукупну небезпеку, для прийняття рішень в контексті прогнозування і раннього попередження про різні небезпеки.

Вже наведений огляд літератури свідчить про важливість інформаційної підтримки прийняття рішень. Сучасним підходом до структурування різноманітної інформації є застосування онтологій [14]. Онтологічний підхід дозволяє інтегрувати експертні знання на основі ієрархічної структури даних та відношень між поняттями та об'єктами предметної області для загального розуміння інформаційних структур, забезпечує багатократне застосування знань, надає засоби для аналізу знань. При цьому важливо, що онтологія забезпечує підтримку прийняття рішень за рахунок можливості програмно-інтерпретованого комп'ютерного подання знань. Враховуючи, що багатокритеріальна задача може бути представленою ієрархічною системою, а метод аналізу ієрархій добре підходить для ієрархічних структур даних, в багатьох роботах пропонується застосуванням MAI разом з онтологіями [15].

Проведений аналіз свідчить, що для прийняття рішень в багатокритеріальному середовищі потрібно застосовувати мультифункціональні методології підтримки, які б враховували інформаційну складність задач [16]. На основі такої методології в роботах [17, 18] запропоновано та обґрунтовано експертний метод, що інтегрує засоби структурування даних предметної області на основі онтологій, методів схвального голосування та MAI, а також інструментарію орієнтованих графів для візуалізації процесів прийняття рішень. З використанням експериментального зразка програмного засобу цього інтеграційного методу, розробленого в Українському науковому центрі розвитку інформаційних технологій, виконано низку апробацій в сфері оборони та цивільного захисту.

Матеріали і методи

Розглянемо одну з апробацій вищеназваного інтеграційного методу на прикладі оцінювання варіантів складу авіаційного угруповання, яке залучається для гасіння ЛП. У прикладі використано модель у складі 5 альтернатив як варіантів складу повітряних суден, наприклад, з літаків одного типу, з літаків одного типу і вертольотів одного типу та ін., а також дворівневої ієрархічної структури критеріїв.

Застосування ієрархічної моделі. З метою спрощення використання результатів експертного оцінювання варіантів організації польотів та зменшення обсягу експертної діяльності перелік альтернатив у даному прикладі обмежений варіантами формування смуги локалізації лісової пожежі та варіантами формування складу авіаційного угруповання, що залучається до гасіння ЛП, оцінювання яких виконується для кожного типу лісової пожежі (приклад типової лісової пожежі: гірська місцевість, верхова пожежа, складна

лінія крайки пожежі та ін.). У табл. 1 наведено перелік альтернативних варіантів формування смуги локалізації лісової пожежі (альтернативи 1-го рівня), для кожного з яких можливі декілька альтернатив 2-го рівня щодо формування складу авіаційного угруповання, що залучається до гасіння ЛП (табл. 2). Таким чином, модель альтернатив представляє дворівневе дерево, наведене на рис. 1.

Таблиця 1. Альтернативні варіанти формування смуги локалізації лісової пожежі (альтернативи 1-го рівня)

Назва альтернативи 1-го рівня	Позначення альтернативи
Послідовно по фронті палаючої крайки	A11
Одночасно по фронті із флангів палаючої крайки	A12
В одній зоні з рознесенням по місцю палаючих осередків	A13

Таблиця 2. Склад авіаційного угруповання

Назва альтернативи 2-го рівня	Позначення альтернативи
3 літаків одного типу	A21
3 вертольотів одного типу	A22
3 вертольотів різних типів	A23
3 групи літаків одного типу і вертольотів одного типу	A24
3 літаків одного типу і вертольотів різного типу	A25

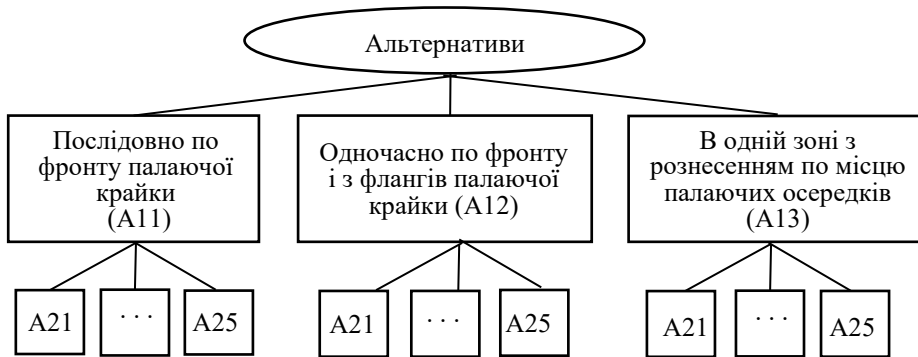


Рис. 1. Модель альтернатив

Як уже зазначалось вище, метою участі авіації у гасінні лісової пожежі є локалізація (зупинення просування) палаючої крайки лісової пожежі визначеної довжини за мінімальний час, з мінімальними фінансовими витратами в умовах прийняттого рівня безпеки польотів. Тому критеріями ефективного застосування авіаційної техніки для гасіння лісової пожежі всіх типів (критерії першого рівня) повинні бути у першу чергу час на локалізацію пожежі, фінансові витрати на локалізацію пожежі та безпека виконання польотів (табл. 3). На другому рівні використовуються 7 критеріїв (табл. 4).

Таким чином, ієрархія критеріїв має три кущі критеріїв 1-го рівня, кожний з яких має власні гілки критеріїв 2-го рівня (рис. 2). Повна ієрархія моделі прикладу для застосування МАІ наведена на рис. 3.

Таблиця 3. Критерії ефективного застосування авіаційної техніки для гасіння лісових пожеж 1-го рівня

Назва критерію 1-го рівня	Позначення критерію
Час на локалізацію пожежі	K11
Фінансові витрати на локалізацію пожежі	K12
Безпека виконання польотів	K13

Таблиця 4. Критерії 2-го рівня та їх зв'язок з критеріями 1-го рівня

Назва критерію 2-го рівня	Позначення критерію	Відношення до критерію 1-го рівня
Кількість скидань вогнегасної рідини за один політ	K21	K11
Тривалість дій	K22	K11
Усезгодність	K23	K11
Залежність від висоти полум'я	K24	K13
Залежність від турбулентності потоків	K25	K13
Залежність від задимленості	K26	K13
Вартість залучення повітряних суден за 1 год	K27	K12

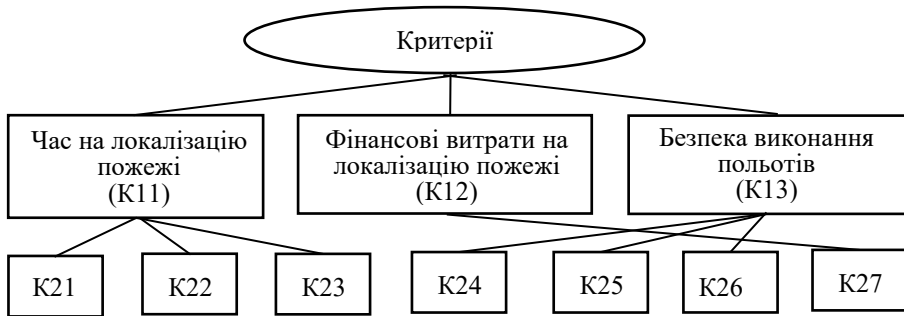


Рис. 2. Критерії двох рівнів

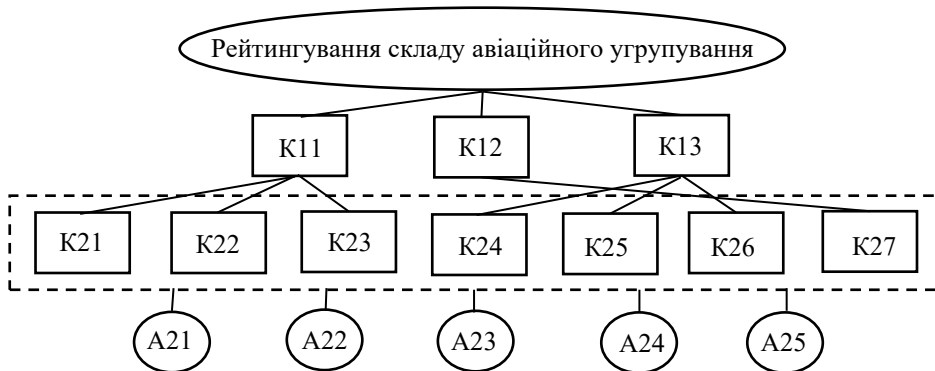


Рис. 3. Ієрархія моделі задачі МАІ для визначення рейтингу складу авіаційного угруповання

У стандартному варіанті застосування методу аналізу ієрархій розглядається один рівень альтернатив, які можуть оцінюватись відповідно до декількох рівнів критеріїв. Тому у нашому прикладі цей метод може бути застосований на першому кроці процедури для альтернатив першого рівня, а потім на другому кроці для альтернатив 2-го рівня для кращої з альтернатив 1-го рівня.

Іншим способом приведення запропонованої моделі альтернатив у прикладі застосування авіації для гасіння лісових пожеж може бути застосування на 1-му кроці методу схвального голосування. Модифікована авторами інтеграційного методу версія методу схвального голосування коротко описана в [18]. Результатом застосування цього методу теж буде відранжований перелік альтернатив 1-го рівня.

Нижче наведена ілюстрація оцінювання варіантів складу авіаційного угруповання, яке залучається для гасіння ЛП, з використанням експериментального зразка програмного засобу, розробленого в Українському науковому центрі розвитку інформаційних технологій, у якому реалізований інтеграційний метод. Детальний опис експериментального зразка наведений в [18].

На рис. 4 наведені фрагменти інтерфейсу програмного засобу при оцінюванні альтернативних варіантів складу повітряних суден для вибраного варіанта формування смуги локалізації лісової пожежі, а саме – «Послідовно по фронту палаючої крайки» (A11).

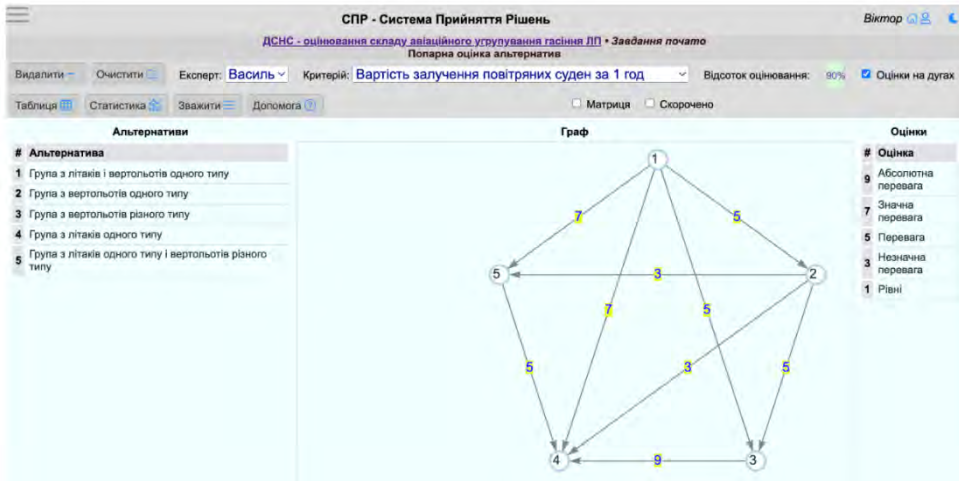


Рис. 4. Фрагменти інтерфейсу програмного засобу при оцінюванні альтернативних варіантів складу повітряних суден для варіанта формування смуги локалізації лісової пожежі «Послідовно по фронту палаючої крайки»

Застосування мережевої моделі. Для врахування додаткових факторів, приміром, ризиків застосування авіації, пов'язаних з турбулентністю, рівнем задимленості, напрямом і швидкістю вітру, іншими метеорологічними умовами та рельєфом місцевості, тобто для вирішення більш складних ресурсних задач, які є дуже актуальними в сучасних умовах, ієрархічної структури вже недостатньо. У якості базового методу у таких задачах застосовується метод аналітичних мереж, який є розвитком методу аналізу

ієрархій і який допускає наявність залежностей між її елементами. Застосування мережевої моделі забезпечує також пошук раціонального рішення з врахуванням спільних дій наземних аварійно-рятувальних підрозділів з екіпажами пожежних повітряних суден. Окрім загальної обстановки, враховуються більш різноманітне коло чинників та їх взаємовпливи, зокрема забезпечення прийнятної безпеки застосування як наземних підрозділів, так і авіації.

Мережеву модель доцільно будувати шляхом послідовного нарощування ієрархічної моделі новими зв'язками між елементами/компонентами, які знаходяться на одному рівні або на різних (необов'язково сусідніх) рівнях ієрархії. Таку мережеву модель (рис. 5) доцільно будувати шляхом розширення вже побудованих раніше моделей.

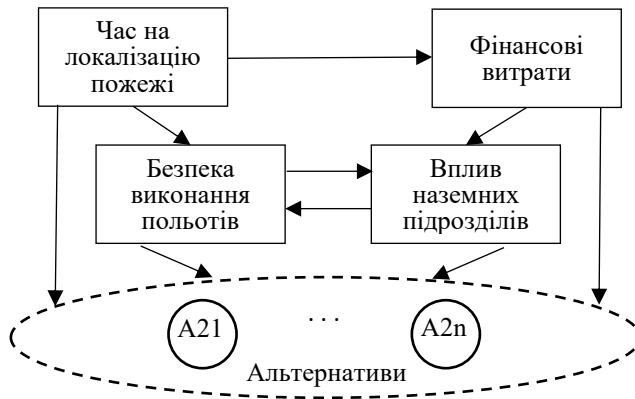


Рис. 5. Приклад мережевої структури для моделювання гасіння лісової пожежі засобами авіації із залученням наземних аварійно-рятувальних підрозділів

На рис. 6 наведена модель для задачі визначення необхідних ресурсів для гасіння лісових пожеж засобами авіації, у якій врахований реально існуючий вплив критеріїв між собою, а саме, критерій «Час на локалізацію пожежі» (К11) впливає на критерій «Фінансові витрати на локалізацію пожежі» (К12) та «Безпека виконання польотів» (К13).

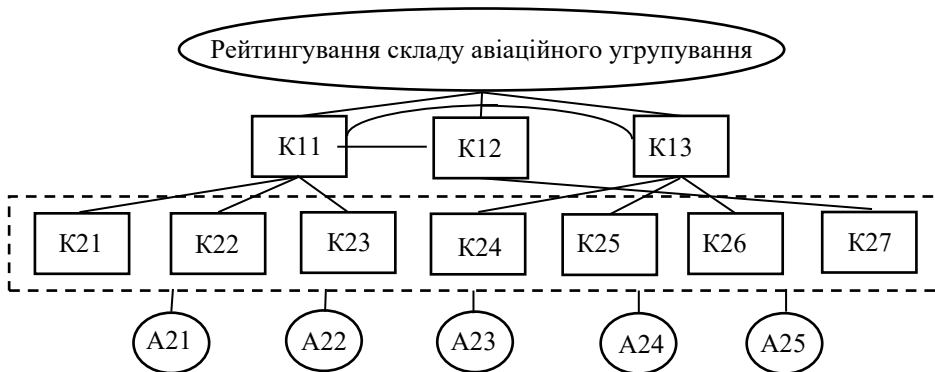


Рис. 6. Мережева модель для оцінювання варіантів складу авіаційного угруповання, яке залучається до гасіння лісової пожежі

Для розв'язання задач із застосуванням МАМ рекомендовано використовувати одну із найбільш поширених на сьогоднішній день СППР SuperDecisions, яка вільно розповсюджується. Розв'язання задач методом аналітичних мереж в SuperDecisions виконується в декілька етапів: формування структури задачі; оцінка елементів ієрархії; формування суперматриць і розрахунок коефіцієнтів важливості елементів; аналіз отриманих результатів.

На рис. 7 представлена ієрархічна модель предметної області в середовищі Super Decisions, яка складається з кластерів (мета, критерії, підкритерії (вузли, елементи), альтернативи) і зв'язків між ними. На рис. 8 відображена мережева модель, яка створена додаванням зв'язку між K11 і K12.

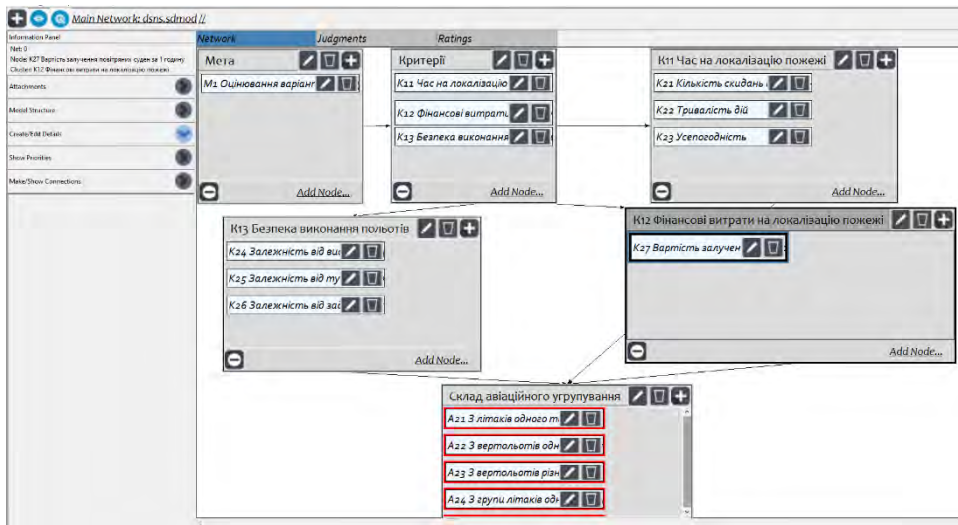


Рис. 7. Ієрархічна модель предметної області

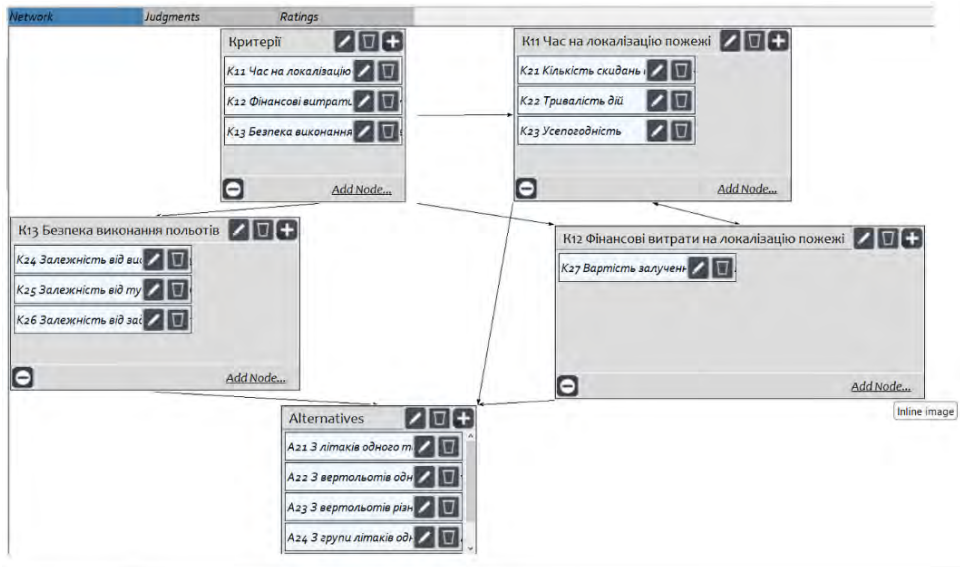


Рис. 8. Мережева модель предметної області

Оцінка елементів моделі виконується шляхом попарного порівняння для всіх наборів вузлів. Причому вузли, які підлягають попарному порівнянню, можуть знаходитись як в одному, так і в різних кластерах. На рис. 9 наведений приклад попарних порівнянь альтернатив по підкритерію K27.

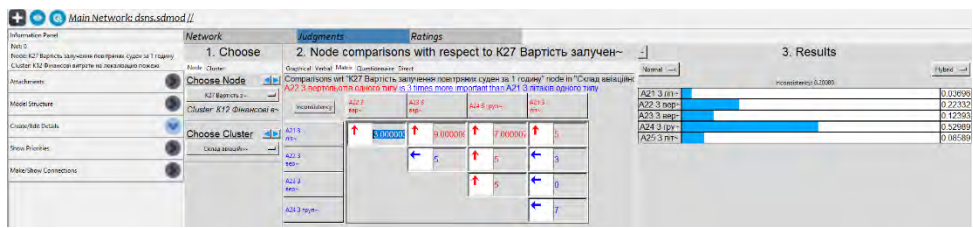


Рис. 9. Приклад попарних порівнянь альтернатив по підкритерію K27

При цьому використовується шкала Т. Сааті, яка передбачає значення від 1 (однакова значимість) до 9 (абсолютна перевага). Аналогічним способом виконуються попарні порівняння по всіх зв'язках моделі.

Згідно з МАМ після проведення попарних порівнянь формуються зважена, незважена і гранична матриці. В результаті обчислень по алгоритму МАМ отримується графічне представлення та значення пріоритетів альтернатив (рис. 10).

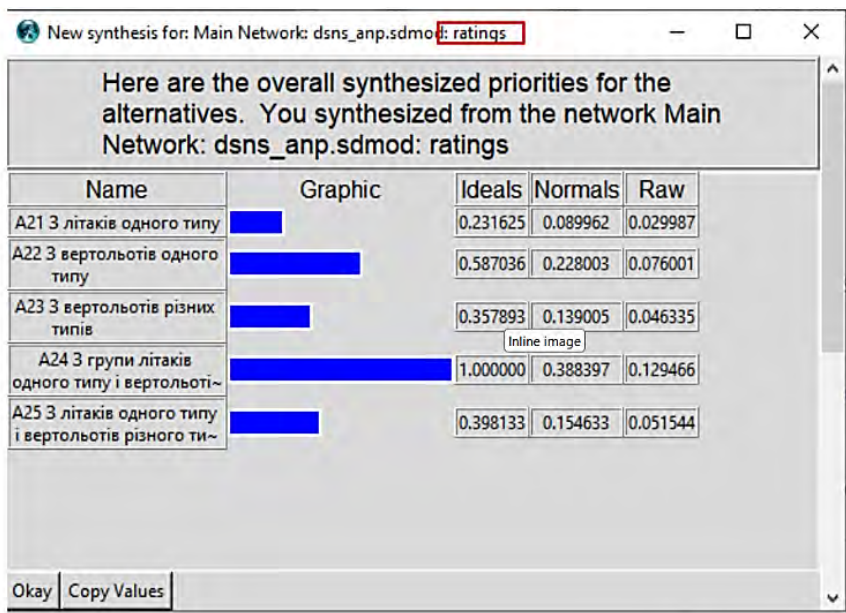


Рис. 10. Графічне представлення та значення пріоритетів альтернатив

Super Decisions також надає можливість розрахувати рейтинг альтернатив по кожному з критеріїв. На рис. 11 наведено приклад рейтингів для підкритерію K27.

Для практичного використання кращих варіантів складу авіаційного угруповання, що залучається до гасіння лісової пожежі (альтернативи 2-го

рівня), необхідно розробляти планові таблиці польотів, у яких конкретизуються типи повітряних суден, дані про екіпажі, погодинний графік польотів, кількість заправлень та скидань, сумарний наліт та загальна вартість залучення авіації з урахуванням віддаленості аеродромів базування та водоєм водозабору від центру ЛП, спроможності у формуванні смуги локалізації та рівня підготовки і готовності екіпажів повітряних суден.

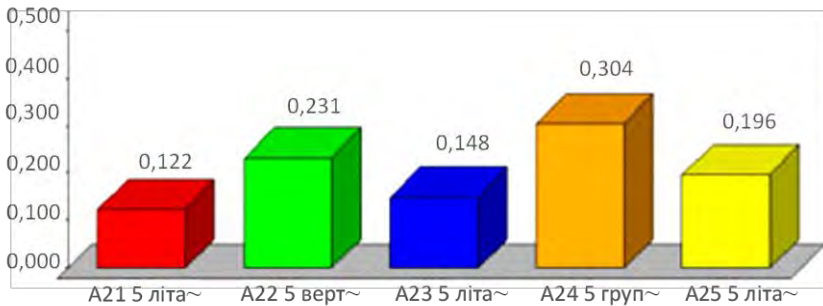


Рис. 11. Рейтинг альтернатив по підкритерію K27

При цьому використовуються атрибутивні описи об'єктів онтологічної моделі, а саме “Склад льотних екіпажів” та “Нормативні обмеження”. Доступність даних таких описів для особи, що приймає рішення, забезпечується їх наявністю в базі даних інформаційної системи, яка може використовуватись для підтримки планування польотів.

Висновки

За результатами досліджень, наведених в даній роботі, розглянуто питання підтримки прийняття рішень при визначенні ресурсного забезпечення сил цивільного захисту при гасінні лісових пожеж; визначено основні особливості прийняття рішень в умовах багатокритеріальності та інформаційної складності завдань; показано необхідність застосування мультифункціонального інструментарію для забезпечення структурування даних, підтримки експертних суджень та візуалізації процесів прийняття рішень; наведено приклад, що демонструє можливість використання інтеграційного експертного методу та відповідних інформаційних технологій для визначення ресурсів авіаційних угруповань з метою формування плану оперативного реагування з метою ліквідації лісових пожеж, що сприятиме раціональному використанню матеріальних, людських і фінансових ресурсів, зниженню втрат та збитків від надзвичайних ситуацій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Нестеренко О.В. Метод експертної оцінки спроможностей сил цивільного захисту. Екологічна безпека та природокористування. 2021. Вип. 3 (39). С. 88-101. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.88-101>
2. Зібцев С.В., Сошенський О.М., Миронюк В.В., Гуменюк В.В. Ландшафтні пожежі в Україні: поточна ситуація та аналіз чинної системи охорони природних територій від пожеж. Український журнал лісівництва та деревинознавства. 2020. № 2. С. 15-31.

3. Хижняк В.В., Шевченко В.Л. Теоретичні засади інноваційних рішень в управлінні безпекою польотів державної авіації. Цивільний захист та пожежна безпека. 2017. №2 (4). С. 73-80.
4. Thiebes B., Winkhardt-Enz R. Challenges and opportunities using new modalities and technologies for multi-risk management. *Natural Hazards*. 2022. 1-4. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05516-3>
5. Goode EJ, Thomas E., Landeg O., and all. Development of a Rapid Risk and Impact Assessment Tool to Enhance Response to Environmental Emergencies in the Early Stages of a Disaster: A Tool Developed by the European Multiple Environmental Threats Emergency NETWORK (EMETNET) Project. *International journal of disaster risk science*, 2021. 12(4). P. 528-539. <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00352-8>
6. Wang L., Wu P., Chu F. A multi-objective emergency scheduling model for forest fires with priority areas. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, December 2020. 9309821. 2020. Pp. 610–614. <https://doi.org/10.1109/IEEM45057.2020.9309821>
7. Ekström L., Große C. Choice of airport in extinguishing wildfires: Model and cases. *Proceedings of the 9th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems ICORES 2020*. 22- 24 February 2020, Valletta. 2020. 158677. 364–371.
8. Pagano A., Giordano R., Vurro M. A Decision Support System Based on AHP for Ranking Strategies to Manage Emergencies on Drinking Water Supply Systems. *Water Resources Management*. 2021. 35. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02741-y>
9. Bruzzese S., Blanc S., Novelli S., Brun F. A Multicriteria Analysis to Support Natural Resource Governance: The Case of Chestnut Forests. *Research*. 2023. 12(3). 40. <https://doi.org/10.3390/resources12030040>
10. Rivière M., Lenglet J., Noirault A., Pimont F., Dupuy J.-L. Mapping territorial vulnerability to wildfires: A participative multi-criteria analysis. *Forest Ecology and Management*. 2023. Vol. 539. 121014. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121014.2>
11. Padilla L. M., Creem-Regehr S. H., Hegarty M. et al. Decision making with visualizations: a cognitive framework across disciplines. *Cogn. Research*. 2018. 3, 29. <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0120-9>
12. Hindalong E., Johnson J., Carenini G., Munzner T. Towards Rigorously Designed Preference Visualizations for Group Decision Making. *IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*; proceedings paper. 14-17 April, 2020, Tianjin, China. 2020181-190. <https://doi.org/10.1109/PacificVis48177.2020.5111>
13. Vitolo C., Di Napoli C., Di Giuseppe F., Hannah L. C., Pappenberger F. Mapping combined wildfire and heat stress hazards to improve evidence-based decision making. *Environment International*. 2019. Vol. 127. P. 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.008>
14. Nesterenko O., Trofymchuk O. Patterns in forming the ontology-based environment of information-analytical activity in administrative management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 5/2 (101). Pp. 33-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180107>
15. Xu F.-X., Liu X.-H., Chen W., Zhou C., Cao B.-W. An ontology and AHP based quality evaluation approach for reuse parts of end-of-life construction machinery. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3481030>
16. Nesterenko O., Netesin I., Polischuk V., Selin Y. Multifunctional Methodology of Expert Evaluation Alternatives in Tasks of Different Information Complexity. *IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*. 2021. Pp. 226-231. <https://doi.org/10.1109/ATIT54053.2021.96787428>
17. Nesterenko O., Netesin I., Polischuk V., Trofymchuk O. Development of a procedure for expert estimation of capabilities in defense planning under multicriterial conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 4/2 (106). P. 33-43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208603>

18. Поліщук В.Б., Нетесін І.Є., Нестеренко О.В. та ін. Інформаційні технології в управлінні оборонними ресурсами: методологічний контекст та приклади практичної реалізації. Частина 2 / Монографія. [За ред. В.Б. Поліщука]. Київ: УкрНЦ РІТ, 2021. 205 с.

Стаття надійшла до редакції 03.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 13.06.2023

REFERENCES

1. Nesterenko, O.V. (2021). Expert assessment of capabilities civil defense forces. *Environmental Safety and Natural Resources*, 39(3), 88–101 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.88-101>
2. Zibtsev, S.V., Soshenskyi, O.M., Myroniuk, V.V., & Humeniuk, V.V. (2020). Landscape fires in Ukraine: current situation and analysis of the current system of protection of natural areas from fires. *Ukrainskyi zhurnal lisivnytstva ta derevynoznavstva*, 2, 15-31 [in Ukrainian].
3. Khyzhniak, V.V., & Shevchenko V.L. (2017). Theoretical foundations of innovative solutions in the management of flight safety of state aviation. *Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 4 (2), 73-80 [in Ukrainian].
4. Thiebes, B., & Winkhardt-Enz, R. (2022). Challenges and opportunities using new modalities and technologies for multi-risk management. *Natural Hazards*, 1-4. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05516-3>
5. Goode, E.J., Thomas, E., Landeg, O., et al. (2021). Development of a Rapid Risk and Impact Assessment Tool to Enhance Response to Environmental Emergencies in the Early Stages of a Disaster: A Tool Developed by the European Multiple Environmental Threats Emergency NETwork (EMETNET) Project. *International journal of disaster risk science*, 12(4), 528-539. <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00352-8>
6. Wang, L., Wu, P., & Chu, F. (2020). A multi-objective emergency scheduling model for forest fires with priority areas. *Proceeding of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, December, 2020*, 610–614, 9309821. <https://doi.org/10.1109/IEEM45057.2020.9309821>
7. Ekström, L., & Große, C. (2020). Choice of airport in extinguishing wildfires: Model and cases. *Proceedings of the 9th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems ICORES 2020*, 22- 24 February, 2020, Valletta. 158677, 364-371.
8. Pagano, A., Giordano, R., & Vurro, M. (2021). A Decision Support System Based on AHP for Ranking Strategies to Manage Emergencies on Drinking Water Supply Systems. *Water Resources Management*, 35, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02741-y>
9. Bruzzese, S., Blanc, S., Novelli, S., & Brun, F. (2023). A Multicriteria Analysis to Support Natural Resource Governance: The Case of Chestnut Forests. *Research*, 12 (3), 40. <https://doi.org/10.3390/resources12030040>
10. Rivière, M., Lenglet, J., Noirault, A., Pimont, F., & Dupuy, J-L. (2023). Mapping territorial vulnerability to wildfires: A participative multi-criteria analysis. *Forest Ecology and Management*, 539, 121014. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121014.2>
11. Padilla, L.M., Creem-Regehr, S.H., Hegarty, M. et al. (2018). Decision making with visualizations: a cognitive framework across disciplines. *Cogn. Research*, 3, 29. <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0120-9>
12. Hindalong, E., Johnson, J., Carenini, G., Munzner, T. (2020). Towards Rigorously Designed Preference Visualizations for Group Decision Making. *Proceedings of the IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*, 14-17 April, 2020, Tianjin, China, 181-190. <https://doi.org/10.1109/PacificVis48177.2020.5111>
13. Vitolo, C., Di Napoli, C., Di Giuseppe, F., Hannah, L. C., & Pappenberger, F. (2019). Mapping combined wildfire and heat stress hazards to improve evidence-based decision making. *Environment International*, 127, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.008>

14. Nesterenko, O., & Trofymchuk O. (2019). Patterns in forming the ontology-based environment of information-analytical activity in administrative management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5/2 (101). 33-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180107>
15. Xu, F.-X., Liu, X.-H., Chen, W., Zhou, C., & Cao, B.-W. (2018). An ontology and AHP based quality evaluation approach for reuse parts of end-of-life construction machinery. *Mathematical Problems in Engineering*. 3481030. <https://doi.org/10.1155/2018/3481030>
16. Nesterenko, O., Netesin, I., Polischuk, V., & Selin, Y. (2021). Multifunctional Methodology of Expert Evaluation Alternatives in Tasks of Different Information Complexity. *Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 226-231. <https://doi.org/10.1109/ATIT54053.2021.96787428>
17. Nesterenko, O., Netesin, I., Polischuk, V., & Trofymchuk, O. (2020). Development of a procedure for expert estimation of capabilities in defense planning under multicriterial conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/2 (106), 33-43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208603>
18. Polishchuk, V.B., Netesin, I.E., Nesterenko, O.V. et al. (2021). *Information technologies in the management of defense resources: methodological context and examples of practical implementation*. Part 2. Monograph. [Ed. V.B. Polishchuk]. Kyiv: UkrNTs RIT.

The article was received 03.03.2023 and was accepted after revision 13.06.2023

Нестеренко Олександр Васильович

доктор технічних наук, доцент, старший дослідник, завідувач кафедри інформаційних технологій, Міжнародний європейський університет

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

ORCID ID: 0000-0001-5329-889X **e-mail:** oleksandr_nesterenko@ieu.edu.ua

Поліщук Валерій Борисович

кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Державне підприємство «Український науковий центр розвитку інформаційних технологій»

Адреса робоча: 03187, Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 44

ORCID ID: 0000-0001-6991-0617 **e-mail:** valery.polischuk@ukr.net

Хижняк Володимир Віталійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри авіації та авіаційного пошуку і рятування, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Адреса робоча: 02000, Україна, м. Київ, вул. Вишгородська, 21

ORCID ID: 0000-0003-0437-749X **e-mail:** ndc.avia@gmail.com

Шевченко Віктор Леонтійович

кандидат військових наук, доцент, доцент кафедри авіації та авіаційного пошуку і рятування, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Адреса робоча: 02000, Україна, м. Київ, вул. Вишгородська, 21

ORCID ID: 0000-0002-8360-0217 **e-mail:** vikleon.shevchenko@gmail.com

УДК 502.2:681.324:355.3

Oleksii Rogozhin, D. S. (Economics), Principal researcher
ORCID ID: 0000-0001-8101-9368 *e-mail*: olexarog@gmail.com

Yevheniy Yakovlev, D. S., Principal researcher
ORCID ID: 0000-0001-6562-4015 *e-mail*: yakovlevhydro@gmail.com

Dmytro Kreta, PhD, Senior researcher
ORCID ID: 0000-0001-5897-0008 *e-mail*: dim.leo@gmail.com

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

THE UPDATED ELECTRONIC MAP OF THE OVERWETTING MANIFESTATION AND DEVELOPMENT BY CAUSES IN UKRAINE

***Annotation.** The article in historical retrospect considers the experience of mapping and analysis of regional manifestations and risk of land overwetting in Ukraine as a leading process of modern changes in the ecological state of its geological environment. Since the importance of such monitoring increases in the conditions of technogenic regulating of surface runoff (on more than 75% of the riverbeds length as regional drains of soil aquifers), the impact of climate change, and the need to take into account the activation of dangerous exogenous geological processes during the implementation of post-war reconstruction and infrastructure restoration programs. The results of works on the mapping in part of updating the electronic "Map of the manifestation and development of overwetting by causes in the territory of Ukraine for 2015" in the ArcGis 10.2 environment are outlined. The results of a GIS analysis of overwetting territorial distribution in the territory of Ukraine and its changes for 2002-2015 are also presented in relation to the risks of other dangerous processes activation, especially on wetted loess rocks. These studies become an argument for the greening of environmental management policy in areas of technogenic risk and natural & technogenic risk of overwetting, especially in parts of irrigation technologies, restoration of surface and underground runoff, reconstruction of large reservoirs, modernization of water supply and drainage systems in urbanized areas. It is especially emphasized that for the proper justification and functioning of monitoring, it is necessary to fully restore periodic field surveys of overwetting manifestation, primarily in the areas affected by mass flooding of mines in mining areas.*

***Keywords:** overwetting; natural and technogenic factors; regional risk; dangerous exogenous geological processes; loess rocks.*

© О.Г. Рогожин, С.О. Яковлев, Д.Л. Крета, 2023

О.Г. Рогожин, Є.О. Яковлев, Д.Л. Крета

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

ОНОВЛЕНА ЕЛЕКТРОННА КАРТА ПРОЯВУ ТА РОЗВИТКУ ПІДТОПЛЕННЯ ЗА ПРИЧИНАМИ В УКРАЇНІ

***Анотація.** У статті в історичній ретроспективі розглядається досвід картографічного відображення й аналізу регіональних проявів та ризику підтоплення земель в Україні як провідного процесу сучасних змін екологічного стану її геологічного середовища. Оскільки важливість такого моніторингу збільшується в умовах техногенного зарегулювання поверхневого стоку (на понад 75% протяжності річкових русел як регіональних дренажних ґрунтових водонесних горизонтів), впливу змін клімату та потреби врахування активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів під час реалізації програм повоєнної відбудови й відновлення інфраструктури. Викладено результати робіт з картографування підтоплення в частині розроблення оновленої електронної «Карти прояву та розвитку підтоплення за причинами на території України на 2015 р.» у середовищі ArcGis 10.2. Викладено також результати ГІС-аналізу територіального розподілу підтоплення по території України і його зміни за 2002-2015 рр. у взаємозв'язку з ризиками активізації інших небезпечних процесів, особливо у масивах підтоплених лесових порід. Ці дослідження стають аргументом для екологізації політики природокористування у ареалах ризику техногенного і природно-техногенного підтоплення, особливо в частині технологій зрошення, відновлення поверхневого і підземного стоку, реконструкції великих водосховищ, осучаснення систем водопостачання і водовідведення в урбанізованих районах. Наголошується, що для належного обґрунтування і функціонування моніторингу підтоплення необхідно відновити у повному обсязі періодичні польові обстеження його проявів, передусім у зонах впливу масового затоплення шахт в гірничовидобувних районах.*

***Ключові слова:** підтоплення; природні і техногенні фактори; регіональний ризик; небезпечні екзогенні геологічні процеси; лесові породи.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.124-137>

Вступ

Кінцевим «депо» для більшості техногенних впливів на довкілля є геологічне середовище (ГС). Його екологічний стан інерційний, але в разі значного погіршення призводить до деградації всіх інших компонентів природного середовища. В умовах повномасштабної війни в Україні порушення природно-техногенної рівноваги екологічного стану ГС зростає, як внаслідок руйнівних бойових дій, так і через зменшення уваги до дотримання природоохоронного законодавства у господарській діяльності. Відповідно збільшується й негативний вплив регіонального розвитку процесів підтоплення земель, що актуалізує завдання його своєчасної оцінки і прогнозування.

Явище «підтоплення» (wetting), тобто перезволоження ґрунтів і підґрунтя внаслідок високого стояння ґрунтових вод аж до їх виходу на денну поверхню, часто є прямим наслідком «затоплення» (flooding), епізодичного, періодичного або постійного (в останньому випадку внаслідок підпору поверхневого і підземного стоку), але не є тотожним йому.

Важливість щорічного моніторингу та картографічного відображення і фактичних проявів підтоплення, і ширших ареалів, де імовірно такі прояви (тобто де існує значний ризик їх реалізації), впливає з того, що саме наявність підтоплення:

- стає стартовою ланкою для активізації інших небезпечних екзогенних геологічних процесів (ЕГП), таких як: карсту і суфозії (на карбонатних і гіпсових породах), зсувоутворення (на схилах), просядковості (на лесових породах підгрунтя), *зменшення міцності порід підгрунтя* та руйнівні деформації будівель у промислово-міських агломераціях (ПМА);

- призводить до збільшення інтенсивності сейсмічних струшувань на обводнених піщаних, супіщаних і суглинистих слабопроникних ґрунтах приблизно до 1–2 балів (за шкалою МСК-64) понад зональні (транзитні) значення;

- спричиняє *геотехнічну деградацію лесових порід* підгрунтя (через порушення водно-сольового балансу) аж до їх тиксотропного розрідження і втрати несучої здатності (внаслідок стрімкого зростання порового тиску в разі потужних сейсмічних струшувань природного, техногенного або воєнного походження) [1, 2, 3].

Наші спостереження засвідчують, що регіональний розвиток підтоплення в останні 35–40 років значною мірою обумовлений саме техногенним підпором рівнів ґрунтових водоносних горизонтів, спричиненим: масштабним зарегулюванням поверхневого стоку в межах практично усіх річкових басейнів України, некерованим затопленням шахт в гірничовидобувних районах Донбасу, Кривбасу і Карпатського регіону, а також – екологічно недосконалим зрошенням земель Причорномор'я і Придніпров'я відкритими каналами й водогонами.

Розробленням карт ареалів і умов підтоплення за результатами відповідних періодичних обстежень (моніторингу) довгий час займалася Державна геологічна служба, власне ДНВП «Геоінформ України». Ним під науковим керівництвом д.т.н. Є.О. Яковлева за участі фахівців Інституту геологічних наук НАН України акад. В.М. Шестопалова та проф. М.Г. Демчишина створені, зокрема: «Карта підтоплення території України станом на 1982 р.», «Карта районування території УРСР по умовам и степени подтопления» (1986), «Карта оцінки динаміки розвитку підтоплення за період 1982-2002 рр.», «Інженерно-геологічна карта прояву та розвитку підтоплення на території України» (2002), всі в М 1:1000000. Однак після 2004 р., у зв'язку із скороченням фінансування робіт з моніторингу та регіональної оцінки розвитку небезпечних ЕГП, картографування і аналіз факторів підтоплення зупинилися. Останньою спробою їх відновити був початок складання «Карти підтоплення території України» (2015), яка так і не була завершена, після чого всі роботи в цьому напрямі остаточно припинилися.

Тим часом посилення техногенного впливу на довкілля (зокрема, зарегулювання поверхневого стоку із триваючим збільшенням кількості ставків і малих ГЕС) та прискорення глобальних змін клімату (зокрема, нестабільності снігового покриву, зменшення періоду і глибини промерзання ґрунту, нестабільності опадів із збільшенням інтенсивності злив), що яскраво проявилися саме протягом останніх 20 років, об'єктивно актуалізують потребу в сучасних картографічних оцінках розвитку підтоплення в Україні, у т.ч. на регіональному рівні.

Очевидно, що для таких оцінок недостатньо тих даних, які містять «Інформаційні щорічники щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП» (видавалися до 2021 р. включно) із текстовою та табличною інформацією, зокрема щодо площ поширення підтоплення і кількості підтоплених населених пунктів у розрізі адміністративних областей. Згідно з цими даними у 2013 р. площа проявів підтоплення в Україні всього становила 79,44 тис.км², у 2020 р. вона дещо збільшилася, до – 88,82 тис.км². Кількість населених пунктів, в яких відзначалося підтоплення, у 2013 р. дорівнювала 4702, а в 2020 р., навпаки, зменшилася до 4315 [4, с. 55; 5, с. 66]. Скоріше за все, такі суперечливі результати отримані внаслідок недообліку через недостатність первинних обстежень.

Тому *метою* нашого дослідження було завершити складання карти підтоплення території України станом на 2015 р. й удосконалити її на основі всіх доступних даних для здійснення регіональної ГІС-оцінки сучасних умов (факторів) розвитку підтоплення.

Основна частина

Результати виконаного нами аналізу нашо вхують на думку, що головним фактором порушення рівноважної геодинамічної взаємодії ґрунтово-породних масивів та поверхневої і підземної гідросфери в останні десятиріччя (1985-2020 рр.) є масштабне будівництво середніх і малих водосховищ та ставків, які переважно зосереджені у басейнах малих річок з невеликими площами водозборів [6]. Це сформувало просторово-часовий підпір потоку ґрунтових вод.

Головними наслідками комбінованого впливу такого розосередженого підпору ґрунтових вод і річкового стоку є:

- регіональне підвищення рівня ґрунтового водоносного горизонту (ГВГ);
- зменшення підземного живлення річкового стоку у літньо-осінню та зимову межені;
- зменшення товщини шару порід зони аерації (ненасиченої фільтрації) та погіршення захищеності підземних вод зони активного водообміну (ґрунтових вод та першого від поверхні напірного горизонту);
- уповільнення поверхневого водообміну з погіршенням його гідроекологічних параметрів;
- збільшення втрат річкового стоку внаслідок випаровування з поверхні водосховищ і ставків (з 11,35 тис.км² це становить до 12 млрд м³ на рік).

Про зростання водно-екологічного впливу штучних поверхневих водних об'єктів в межах рівнинної території України свідчить суттєве збільшення тут загальної площі водного дзеркала усіх водосховищ та ставків до 11,35 тис.км², що в 1,6 раза перевищує площу великих водосховищ р. Дніпро (6,95 тис.км²). Причому просторова розосередженість (мозаїчність) масиву середніх і малих водосховищ та ставків у річкових системах обумовлює стійкі регіональні зміни гідрологічного режиму всієї річкової мережі.

В умовах аномального зарегулювання поверхневого стоку України індикатором підпірного впливу великої кількості середніх і малих водосховищ та ставків можна вважати регіональне збільшення територій стійкого і тимчасового підтоплення у період 1985-2020 рр. з 9,92 тис.км² до 88,82 тис.км² (зростання майже у 9 разів).

В межах рівнинної території України ($S_{\text{рів}} \approx 500 \cdot 10^3 \text{ км}^2$) *питома територіальна щільність ставків* (P) за їх кількості там у $N = 50,8 \cdot 10^3$ становить:

$$P = S_{\text{рів}} / N = (500 \cdot 10^3) / (50,8 \cdot 10^3) = 9,8 \text{ км}^2/\text{став.}$$

Причому відносно рівномірний просторовий розподіл ставків дає змогу оцінити їх підпирний вплив на рівні ґрунтового водоносного горизонту із визначенням величини *геопросторового радіусу* ($R_{\text{пр}}$) за питомою територіальною щільністю ставків (P):

$$R_{\text{пр}} = (P/\pi)^{0,5} = [(9,8 \cdot 10^6 \text{ м}^2/3,14)]^{0,5} = 1,74 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

За умови загальної площі водного дзеркала ставків і середньо-малих водосховищ у $S_0 = 5,24 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ (та сумарної кількості ставків і водосховищ $N_0 = 5,18 \cdot 10^4$) їх орієнтовний *середній радіус гідрогеофільтраційного підпирного впливу* («великого колодязю») на ґрунтовий водоносний горизонт можна оцінити за наступною залежністю:

$$r_{\text{вк}} \approx (S_0 / \pi \cdot N_0)^{0,5} = [(5,24 \cdot 10^9 / 3,14 \cdot 5,18 \cdot 10^4)]^{0,5} \approx 180 \text{ м.}$$

За фондовими даними моніторингових спостережень за змінами рівнів і хімічного складу ґрунтового водоносного горизонту показник його рівнепроводності (гідрогеофільтраційної швидкості хвилі повеневого підпору) дорівнює $a_y \approx 10^4 \text{ м}^2/\text{добу}$. За цих умов під час повеневого підйому поверхні вод у річкових руслах, середньо-малих водосховищах і ставках протягом часу $t \approx 100$ діб орієнтовна *відстань підпирного впливу повеневої хвилі* ($R_{\text{п}}$) на ґрунтовий водоносний горизонт становитиме:

$$R_{\text{п}} \approx 1,5 \cdot (a_y \cdot t)^{0,5} \approx 1,5 \cdot (10^4 \cdot 10^2)^{0,5} \approx 1,5 \cdot 10^3 \text{ м.}$$

Результати вищенаведених розрахунків доводять, що існуючий масив ставків і середньо-малих водосховищ має практично однакові значення радіусів геопросторового розподілу ($R_{\text{пр}} = 1,74 \cdot 10^3 \text{ м}$) та підпирного гідрогеофільтраційного впливу повені на рівні ґрунтового водоносного горизонту ($R_{\text{п}} \approx 1,5 \cdot 10^3 \text{ м}$).

Кількісна оцінка геопросторового розподілу середніх та малих водосховищ ($N_{\text{снм}} = 1047$) і ставків ($N_{\text{ст}} = 50793$) та їх середніх підпорів ($h_{\text{снм}} = 3,60 \text{ м}$, $h_{\text{ст}} = 1,33 \text{ м}$) дає також змогу виконати орієнтовні розрахунки повздожнього порушення гідрологічного профілю річок ($L_{\text{п}}$) з урахуванням середньозважених регіональних значень їх гідравлічного градієнту ($I_{\text{гр}}$): $I_{\text{гр}} \approx 0,5 \cdot 10^{-3}$.

Загальна *сумарна довжина повздожнього підпирного порушення гідрологічних профілів річок* України у зонах впливу середніх і малих водосховищ та ставків визначається наступною залежністю:

$$\begin{aligned} L_{\text{п}} &\approx N_{\text{снм}} \cdot (h_{\text{снм}}/I_{\text{гр}}) + N_{\text{ст}} \cdot (h_{\text{ст}}/I_{\text{гр}}) \approx \\ &\approx (1047 \cdot (3,60/0,5 \cdot 10^{-3}) + 50793 \cdot (1,33/0,5 \cdot 10^{-3})) \approx \\ &\approx (7538 + 135109) \approx 142647 \text{ км.} \end{aligned}$$

Із вищенаведених розрахунків випливає, що за загальної довжини річкової мережі України у $L_{\text{заг}} = 203 \text{ тис.км}$ *частка* (Δ) *регіонального повздожнього порушення* гідрологічного профілю річок ($L_{\text{п}}$) дорівнює :

$$\Delta = L_{\text{п}} / L_{\text{заг}} = (142647 / 203000) \cdot 100\% \approx 84\%.$$

За таких обставин можна дійти висновку, що в межах рівнинної території України, де зосереджена переважна більшість ставків та середніх і малих водосховищ, у ХХІ ст. сформувались умови для регіонального квазістабільного (десь стійкого, десь тимчасового) підтоплення земель, міських та сільських населених пунктів.

В цьому аспекті привертає увагу близькість величини середнього підпору у зонах впливу мозаїчно розподілених ставків та значень середньобогаторічних коливань рівнів ґрунтового водоносного горизонту (0,6–1,3 м), що практично виключає формування гідравлічного градієнту потоку ґрунтових вод у прируслових зонах та сприяє регіональному підйому їх рівнів з наступною активізацією небезпечних ЕГП: підтоплення земель, ерозії, осідань земної поверхні, зсуво- та карстоутворення.

Для регіональних картометричних оцінок ризику підтоплення раніше доводилося використовувати електронну версію «Інженерно-геологічної карти прояву та розвитку підтоплення на території України» (М 1:1000000, 2002 р.), свого часу оцифрованої і накладеної на топооснову М 1:200000 для потреб колишнього МНС України. При цьому контури ареалів підтоплення зазнали вимушеної генералізації, оскільки вплив регіонального техногенного підпору річкового стоку як на регіональну дренаж супроводжується просторово-часовими змінами параметрів поля рівнів ґрунтових водоносних горизонтів. Зазначена карта відображала розподіл ареалів регіонального ризику підтоплення таких *типів* (за умовами і причинами виникнення):

1) Природне (природно-техногенне) під впливом високого стояння ґрунтових вод (у надмірно зволжених природних зонах Полісся і рівнинного Закарпаття).

2) Техногенне у зонах впливу водосховищ (основний ареал у Середньому Придніпров'ї).

3) Техногенне у зонах ділянок зрошення (південні регіони).

4) Природне (природно-техногенне) від перезволоження верхнього шару ґрунту (його зони аерації або ненасиченої фільтрації) через особливості рельєфу та ґрунтового покриву (в Лісостеповій і Північній Степовій зонах).

За результатами ГС-аналізу цієї карти, загальна площа ареалів *регіонального ризику підтоплення* всіх типів на початку 2000-х років становила 163 тис.км², це 27,3% території України. Цілком закономірно, що за площею серед них переважали зони природно високого стояння ґрунтових вод (тип 1, Полісся і Закарпаття) – 58,1%. Але й ареали явно техногенного ризику (типи 2 і 3) становили понад третину площ регіонального підтоплення (35,2% від усіх підтоплених). Ці зони чутливі до активізації підтоплення внаслідок посилення в останні десятиріччя впливу факторів глобальних змін клімату (потепління, збільшення зливових опадів, висоти й частоти повеней і паводків тощо). До всіх ареалів регіонального ризику підтоплення усіх типів тоді входили 8534 населені пункти (з них 392 міські).

Зрозуміло, що значна частина цих населених пунктів потрапляє до ареалів регіонального ризику підтоплення лише частково, часто дуже малою ділянкою своєї площі (особливо це стосується великих за площею міських поселень). Перевищення їх кількості майже в два рази порівняно з кількістю населених пунктів, де зафіксовані прояви підтоплення згідно з даними «Інформаційних щорічників...» [4, 5], пояснюється тим, що ризик реалізується далеко не кожного року і далеко не в усіх загрозованих населених пунктах.

Оскільки розроблення «Карти підтоплення території України» за 2015 р. (М 1:1000000) у ДНВП «Геоінформ України» не було завершено через організаційні причини, нами було здійснено її доопрацювання як електронної «Карти прояву та розвитку підтоплення за причинами на території України на 2015 р.» (рис. 1) – на основі сканованого паперового оригіналу,

геоприв'язаного до «Топографічної електронної карти України з інформацією Держкомстату про чисельність наявного населення України» (2004 р., М 1:200000), з переписною чисельністю населення в населених пунктах на кінець 2001 р. Контури ареалів ризику і прояву підтоплення креслилися вручну згідно з растровими зображеннями сканованого оригіналу засобами інструменту Editor у середовищі ArcGis 10.2 (в картографічній проекції UkraineEquidistantConic). Нев'язки сканованого оригіналу до топооснови не перевищують 2–3 км, що дає підставу надати доопрацьованій карті масштаб 1:1000000.

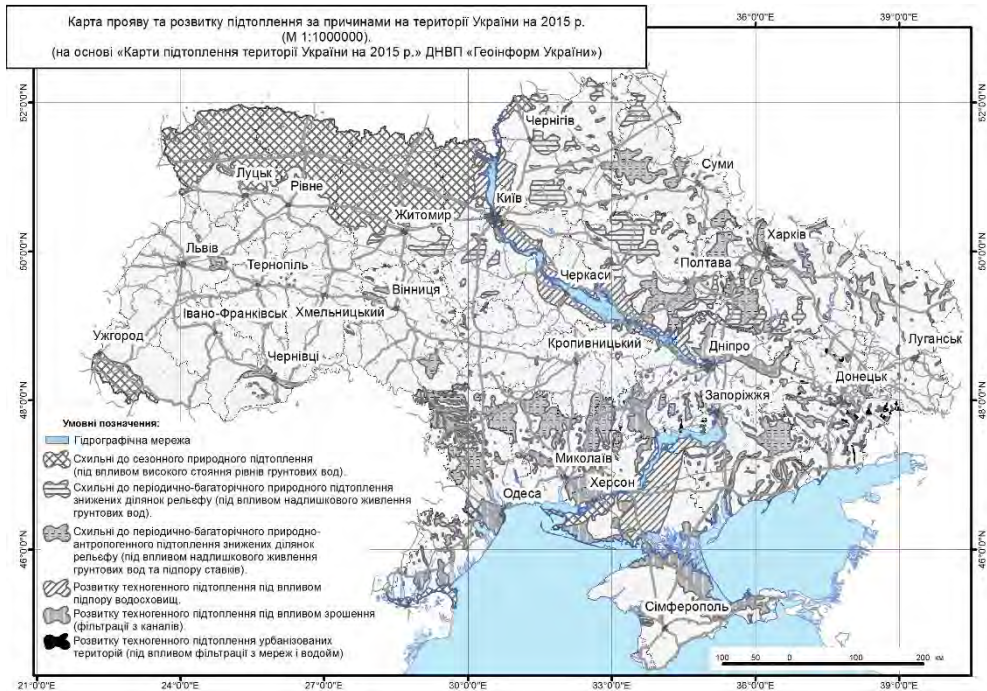


Рис. 1. Доопрацьована «Карта прояву та розвитку підтоплення за причинами на території України на 2015 р.»

В разі потреби отримані контури уточнювалися, доповнювалися та інтерпретувалися за «Картою оцінки динаміки територій розвитку підтоплення за період 1982-2002 рр.» (М 1:1000000) та «Схематической картой оценки распространения и инженерно-геологических параметров подов и блюдец на территории Украины» (автор І.І. Молодих, 1983 р.), оскільки на недоробленому оригіналі наведені, зокрема, заболочені (обводнені) ділянки й поза зоною природно високого стояння рівнів ґрунтових вод, власне поди та блюдця із підвищеним інфільтраційним живленням ґрунтових водоносних горизонтів, особливо у південних регіонах України.

Визначені у такий спосіб контури ареалів поширення ризику підтоплення дешифрувалися за типами умов і факторів генезису (з розподіленням на відповідні картографічні шари). Вдалося визначити такі *типи* умов розвитку підтоплення:

1) Схильність до сезонного природного підтоплення (під впливом природно високого стояння рівнів ґрунтових вод) – у надмірно зволених зонах Волинського, Житомирського та Київського Полісся, рівнинного Закарпаття, заплави нижніх Дунаю, Дніпра і Дністра.

2) Схильність до періодично-багаторічного природного підтоплення знижених ділянок рельєфу (під впливом надлишкового живлення ґрунтових вод) – в Лівобережному Поліссі та Лісостепу, лісостеповій Житомирщині та Київщині.

3) Схильність до періодично-багаторічного природно-антропогенного підтоплення знижених ділянок рельєфу (під впливом надлишкового живлення ґрунтових вод та підпору середніх і малих водосховищ, ставків) – в основному південні, східні регіони та лівобережна частина України.

4) Розвиток техногенного підтоплення під впливом підпору водосховищ – основний ареал у Нижньому та Середньому Придніпров'ї.

5) Розвиток техногенного підтоплення під впливом зрошення (фільтрації з каналів) – південні регіони і Придніпров'я.

6) Розвиток техногенного підтоплення урбанізованих територій (під впливом фільтрації з мереж і водойм) – промислово-міські агломерації в Східному і Придніпровському регіонах.

Ці типи помітно відрізняються від таких за «Інженерно-геологічною картою прояву та розвитку підтоплення на території України» (2002), їх кількість зросла на два за рахунок введення «схильності до періодично-багаторічного природного підтоплення знижених ділянок рельєфу» (тип 2) та «розвитку техногенного підтоплення урбанізованих територій» (тип 6). Типи «розвиток техногенного підтоплення під впливом зрошення» (тип 4) та «розвиток техногенного підтоплення під впливом підпору водосховищ» (тип 5) аналогічні таким у «Інженерно-геологічній карті...». А типи «схильність до сезонного природного підтоплення через природно високе стояння ґрунтових вод» (тип 1) та «схильність до періодично-багаторічного природно-антропогенного підтоплення знижених ділянок рельєфу» (тип 3) відповідні типам «природне (природно-техногенне) під впливом високого стояння ґрунтових вод» та «природне (природно-техногенне) від перезволоження верхнього шару ґрунту» у «Інженерно-геологічній карті...».

За результатами ГИС-аналізу електронної «Карті прояву та розвитку підтоплення за причинами на території України на 2015 р.» загальна площа ареалів регіонального ризику підтоплення всіх типів в середині 2010-х років була 162 т.км² (до 27% території України) – це майже стільки ж, скільки на початку 2000-х рр. За площею серед них переважають типи: «схильність до сезонного природного підтоплення через природно високе стояння ґрунтових вод» (тип 1: 36,1%) та «схильність до періодично-багаторічного природно-антропогенного підтоплення знижених ділянок рельєфу» (тип 3: 26,1%). Ареали явно техногенного ризику (типи 4, 5 і 6) становили 27,7% площ регіонального підтоплення, таблиця 1. В ареали поширення всіх типів регіонального ризику підтоплення потрапило 8639 населених пунктів (до 30% від усіх), з них 464 міських (34,5% від усіх міських). Всіх населених пунктів із ризиком підтоплення виявилось дещо менше (на 1,5%), ніж на початку 2000-х рр. (за рахунок сільських), натомість міських поселень – помітно більше (на 5,7%).

Таблиця 1. Площа ареалів регіонального ризику підтоплення та кількість населених пунктів і населення у них (ГІС-оцінка на 2015 р.)

	Типи підтоплення						Всього
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	Тип 6	
Площа ареалів регіонального підтоплення, т.км ²	58,4	16,4	42,3	22,5	21,4	0,96	161,9
% за типами умов підтоплення	36,1	10,2	26,1	13,9	13,2	0,6	100
Всіх населених пунктів із ризиком підтоплення	2630	1124	2885	879	1037	84	8639
% за типами умов підтоплення	30,4	13,0	33,4	10,2	12,0	1,0	100
з них міських	100	52	154	55	85	18	464
% за типами умов підтоплення	21,6	11,2	33,2	11,9	18,3	3,9	100
Кількість населення, що зазнає ризику підтоплення, млн. осіб	2,43	0,93	2,50	2,66	3,13	0,1	11,76
% за типами умов підтоплення	20,7	7,9	21,3	22,6	26,6	0,9	100
з них міського	1,04	0,56	1,52	2,08	2,47	0,08	7,76
% за типами умов підтоплення	13,5	7,2	19,6	26,8	31,8	1,1	100
Площа ареалів підтоплених лесів, т.км ²	2,21	9,71	31,93	13,13	17,03	0,49	74,5
% за типами умов підтоплення	2,97	13,03	42,86	17,62	22,86	0,66	100
Населених пунктів на підтоплених лесах	225	765	2317	560	882	50	4800
% за типами умов підтоплення	4,7	15,9	48,3	11,7	18,4	1,04	100
з них міських	17	41	127	37	69	11	303
% за типами умов підтоплення	5,6	13,5	41,9	12,2	22,8	3,6	100
Кількість населення, що зазнає ризику на підтоплених лесах, млн	0,31	0,46	0,14	0,86	2,36	0,06	5,39
% за типами умов підтоплення	5,7	8,6	2,5	16,0	43,7	1,1	100
з них міського	0,15	0,28	0,08	0,55	1,87	0,05	3,71
% за типами умов підтоплення	4,0	7,5	2,2	14,8	50,4	1,4	100

Джерело: авторські розрахунки.

Зазначена ситуація в містах корелює з приростом водних втрат із водопровідно-каналізаційних та теплоенергетичних мереж (орієнтовно щорічно на 0,5–1,0% внаслідок корозії та зростання агресивності підтоплених ґрунтів). Так, виконані оцінки балансу водокористування в межах ПМА на основі статистичної звітності підрозділів Мінбуду, Держводгоспу та ін. дають змогу дійти висновку, що в останні 25–30 років має місце зростання втрат води з водопровідно-каналізаційних та теплоенергетичних мереж з 15–20% до 35–45% і більше.

Про значний водно-геотехнічний вплив таких мереж в містах і селищах (загальна протяжність водопровідних, каналізаційних та теплоенергетичних мереж, відповідно, 127,4, 37,6 та 40,8 тис.км при 35–40% аварійних) на інженерно-геологічний стан ГС свідчить їх загальна середня щільність, яка досягає 11,0 км/км². Причому дослідження просторово-часової динаміки зростання площ підтоплення ПМА України з використанням даних ДЗЗ

(мм. Херсон, Дніпро, Запоріжжя, Одеса та ін.) та величини локальних підйомів рівня ґрунтових вод в їх межах засвідчило формування центральних переважно купольних структур («ядер») техногенних ділянок додаткового водонасичення порід зони аерації. Все це відбувається тому, що значна частка енергоспоживання в ПМА пов'язана із забезпеченням функціонування водопровідно-каналізаційних та теплоенергетичних мереж, підвищені водні втрати з яких внаслідок незадовільної гідроізоляції впливають на: підйом рівня ґрунтових вод, додаткові деформації поверхні та прискорення старіння і зношеності будівель [7–10].

При сучасних втратах води в межах ПМА до 1,3 млрд м³/рік, додаткове техногенне живлення ґрунтового горизонту на території міст і селищ (19,6 тис.км²) становить у середньому: $(1,3 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{рік}) / (19,6 \cdot 10^3 \cdot 10^6 \text{ м}^2) = 0,067 \text{ м} = 67 \text{ мм}/\text{рік}$ (або 2,1 л/сек-км²), що майже в 2 рази перевищує багаторічні регіональні значення (~1,0 л/сек-км²) і тому сприяє подальшому підтопленню території міст і селищ.

З огляду на все вищенаведене, можна зробити припущення, що в останні 2–3 десятиріччя незадовільний стан водопровідно-каналізаційних та теплоенергетичних мереж перетворився на головний фактор розвитку підтоплення й погіршення стійкості та соціально-економічних показників житлових і промислових споруд в більшості ПМА України.

При цьому необхідно враховувати, що водно-теплові втрати з водопровідно-каналізаційних та теплоенергетичних мереж у межах міст і селищ мають цілорічний характер, що внаслідок фільтраційної анізотропії найпоширеніших в Україні лесових порід (їх вертикальна проникність до 5–10 разів і більше перевищує горизонтальну) обумовлює довгостроковий куполоподібний підйом рівнів ґрунтових вод (у м. Дніпро – до 35 м) із стійким перезволоженням схилових територій в межах ПМА.

Крім того, під час гідромеліоративних зйомок в Дніпропетровській області, було встановлено, що величина статичного напруження зрушення (СНЗ) перезвожених лесів дорівнює $a_{\text{снз}} = 100\text{--}150 \text{ мг}/\text{см}^2$, що робить їх пливуноздатними і різко зменшує стійкість схилів. Відповідно, *критична стрімкість схилу* ($a_{\text{кр}}$) для даних умов техногенних змін геомеханічних показників та середньої щільності водонасичених лесово-суглинистих порід у $\rho \sim 1,8 \text{ г}/\text{см}^3$ та приросту товщини розрідженого шару (dh) буде дорівнювати:

$$a_{\text{кр}} = \arctg [a_{\text{снз}} / (\rho \cdot dh)]. \quad (1)$$

Розрахунки за вищенаведеною залежністю з використанням фактичних геомеханічних параметрів лесово-суглинистих порід цілком збігаються з фактичними даними щодо зростаючих випадків сучасного зсувоутворення в межах ПМА на схилах зі стрімкістю 5°–7°, а також щодо суфозійних осідань поверхні біля будівель, місць скупчення транспорту, каналізаційних колодязів, де має місце інтенсивна техногенна інфільтрація та активні динамічні зміни порового тиску, геомеханічного та фізико-хімічного стану порід підґрунтя будівель і верхньої зони ГС міст та селищ в цілому [8–12].

Однак більшість населених пунктів в Україні зазнає регіонального ризику підтоплення у зонах періодично-багаторічного природно-антропогенного підтоплення знижених ділянок рельєфу (тип 3) – 2885 (33,4% від усіх підтоплених поселень) та сезонного підтоплення через природно високе

стояння ґрунтових вод (тип 1), 2630 (30,8% від усіх підтоплених поселень). Під ризик явно техногенного підтоплення (типи 4, 5 і 3) потрапило лише 2000 населених пунктів (23,2% від усіх підтоплених поселень), зокрема 158 міських (34,1% від усіх підтоплених міських поселень).

Регіонального ризику всіх типів підтоплення зазнає до 11,76 млн осіб (24,3% всього населення України). Причому більша частина такого населення перебуває під загрозою явно техногенного підтоплення (типи 4, 5, 6: 50,1% від усього підтопленого населення), переважно внаслідок зрошення та підпору водосховищ. В умовах зростаючого впливу зарегульованого поверхневого стоку та глобальних змін клімату це збільшує загрозу погіршення безпеки життєдіяльності у більшості регіонів України. Більшу частину загроженого населення становить міське – 7,76 млн осіб (24,1% всього міського населення). Явно техногенного ризику зазнає більшість (59,7%) підтопленого міського населення, переважно внаслідок зрошення та підпору водосховищ. Натомість загрожене сільське населення здебільшого зазнає ризику сезонного природного підтоплення під впливом високого стояння рівнів ґрунтових вод (34,8%), а також – періодично-багаторічного природно-техногенного підтоплення під впливом надлишкового живлення ґрунтових вод та підпору ставків (24,5%). Разом ці типи підтоплення були характерними для 59,4% загроженого сільського населення.

Розроблення нами оновленої електронної карти дало змогу актуалізувати територіальний ГІС-аналіз впливу фактору підтоплення на розвиток небезпечних ЕГП на нестійких до перезволоження породах підґрунтя, особливо на лесах, площа поширення яких перевищує 60% території України.

Так, поєднання картографічних шарів контурів регіонального ризику підтоплення і контурів поширення лесових порід (за «Картою поширення лесових ґрунтів за просадковістю на території України», 1995 р., М 1:1000000, ДНВП «Геоінформ України) інструментом Intersect виявило ареали перезволожених (підтоплених) лесів (загальною площею 74,5 т.км², понад 12,4% території країни), а їх подальше поєднання з картографічним шаром «населені пункти» топокарти М 1:200000 – сільські і міські поселення, що потрапляють у них. Найбільша частка (42,9%) перезволожених лесів зазнає ризику підтоплення за типом 3 (періодично-багаторічне природно-антропогенне підтоплення знижених ділянок рельєфу), наступна позиція (22,9%) – підтоплення за типом 5 (під впливом зрошення). Ризику чисто техногенного підтоплення (типи 4, 5, 6) зазнає 41,1% території перезволожених лесів.

Населених пунктів на перезволожених лесах виявилось 4799 всього і 302 міських, причому найбільша частка з них (48,3% і 41,9%, відповідно) також зазнає загрози підтоплення саме за типом 3. Загрози техногенного підтоплення (типи 4, 5, 6) зазнає 31,2% населених пунктів, зокрема 38,9% міських поселень на підтоплених лесах. Натомість найбільша частка всього населення на перезволожених лесах, особливо міського, піддається загрозі саме техногенного підтоплення за типом 5 (під впливом зрошення) – 43,7% і 50,4%, відповідно (за рахунок міста-мільйонника Одеси). Причому ризику всіх типів техногенного підтоплення (4, 5, 6) піддано 60,8% всього населення і 66,6% (дві третини!) міського населення, що мешкає на перезволожених лесах. Тобто саме техногенний фактор є провідним у генеруванні ризику підтоплення на перезволожених лесах в Україні.

Висновки

Розроблення оновленої електронної «Карти прояву та розвитку підтоплення за причинами на території України на 2015 р.» передусім дало змогу актуалізувати територіальний ГІС-аналіз розподілу підтоплення по території України у взаємозв'язку з ризиками активізації інших небезпечних ЕГП.

Однак її функціональність не вичерпується цим. Вона може бути однією з підстав (стартовою позицією) для перегляду будівельних норм і правил, зокрема в частині оцінки геотехнічної стійкості підгрунтя фундаментів і несучих конструкцій будівельних споруд у напрямі їх посилення на загрозованих територіях, особливо на підтоплених лесових породах. Такий перегляд набуває зростаючої актуальності в контексті майбутніх широкомасштабних програм відбудови/реконструкції населених пунктів та інфраструктури, пошкоджених/зруйнованих в ході російсько-української війни.

Крім того, зазначена карта є аргументом для зміни політики (й загалом підходів) до природокористування у ареалах ризику техногенного і природно-техногенного підтоплення, особливо щодо екологізації технологій зрошення (для мінімізації фільтрації з каналів тощо), відновлення поверхневого і підземного стоку річок (ліквідація зайвих ставків, реконструкція великих водосховищ із зниженням їх нормального підпорного рівня тощо), осучаснення систем водопостачання і водовідведення в урбанізованих районах (їх реконструкція із застосуванням жорстких екологічних норм).

Ця карта може бути також одним з елементів наукового обґрунтування програм екологічної реабілітації зруйнованих війною регіонів України.

Звісно, що для належної реалізації всього цього вона потребуватиме подальшого доопрацювання за оновленими даними польових обстежень моніторингу проявів підтоплення, який слід відновити у повному обсязі на всій території України у періодичності хоча б 1 раз на 3 роки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рогожин О.Г., Яковлев Є.О. Потенційний приріст сейсмічності в Україні як фактор зростання ризику життєдіяльності від аварій на хіміко-небезпечних ПНО / О.Г. Рогожин, Є.О. Яковлев // Екологічна безпека та природокористування. – К. – 2015. – Вип. 1(17). – С. 15–27.
2. Яковлев Є.О., Рогожин О.Г. Фактори і можливі наслідки регіональних змін інженерно-геотехнічного стану лесів та лесово-суглинистих порід України / Є.О. Яковлев, О.Г. Рогожин // Екологічна безпека та природокористування. – К. – 2018. – Вип. 3(27). – С. 5–23.
3. Яковлев Є.О., Рогожин О.Г. Фундаментальний екологічний фактор забезпечення сталого розвитку регіонів України / Сталій розвиток – XXI століття. Дискусії 2021: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції / Національний університет «Кієво-Могилянська академія» / за ред. проф. Хлобистова Є.В. – Київ, 2021. – С. 114–119.
4. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2013. – 101 с.

5. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП – Київ, Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2021. – 78 с.
6. Яцик А.В. Водогосподарська екологія: у 4 т., 7 кн. – К.: Генеза, 2003. – Т.1, кн. 1-2. – 400 с.
7. Довгий С.О., Лялько В.І., Трофимчук О.М. та ін. Інформатизація аерокосмічного землезнавства. – К.: Наукова думка, 2001. – 606 с.
8. Шестопапов В.М., Трофимчук А.Н., Лущик А.В., Яковлев Е.А. Эколого-геодинамические аспекты влияния регионального подъема уровня грунтовых вод и подтопления земель Украины на снижение инженерно-сейсмогеологической безопасности жилищных и промышленных объектов // Труды Международной научной конференции. – Москва, МГУ. 2006. – С. 142–144.
9. Трофимов В.Т., Королев В.А. (ред.). Инженерная геология массивов лесовых пород. – М.: МГУ, 2004. – 139 с.
10. Вознесенский В.А., Коваленко В.Г., Кушнарева Е.С., Фуникова В.В. Разжижение грунтов при циклических нагрузках. – М.: МГУ, 2005. – 134 с.
11. Яковлев Є.О., Черний В.Г., Шокарев В.С. Аналіз замочування лесових ґрунтів України та ймовірнісні оцінки параметрів плям замочування у межах видовжених капітальних об'єктів // Екологія і ресурси. – К. – 2003. – №6. – С. 124–129.
12. Рудько Г.І. Техногенно-екологічна безпека геологічного середовища (наукові та методологічні основи) // Монографія. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Я. Франка, 2001. – 359 с.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2023 і прийнята до друку після рецензування 23.05.2023

REFERENCES

1. Rogozhin, O.G., & Yakovlev, E.O. (2015). Potential increase of seismic in Ukraine as a factor of life risk growth from accidents on chemically dangerous objects. *Environmental safety and natural resources*, 1(17), 15-27 [in Ukrainian].
2. Yakovlev, Y., & Rogozin, O. (2018). The factors and possible consequences of regional changes in engineering and geotechnical status of loesses and loessy-loamy soils of Ukraine. *Environmental Safety and Natural Resources*, 27(3), 5–23 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.3.5-23>
3. Yakovlev E.O., & Rogozhin O.G. (2021). A fundamental environmental factor for ensuring the sustainable development of the regions in Ukraine. In E.V. Khlobistov (Ed.) *Sustainable development – XXI century. Discussions 2021: materials of the VII International Scientific and Practical Conference* (pp. 114-119). Kyiv: National University "Kyiv-Mohyla Academy" [in Ukrainian].
4. Information yearbook on the activation of dangerous exogenous geological processes on the territory of Ukraine according to monitoring data of EGP. (2013). Kyiv: State Service of Geology and Bosom of Ukraine, State Research and Production Enterprise "State Geological Information Fund of Ukraine" [in Ukrainian].
5. Information yearbook on the activation of dangerous exogenous geological processes on the territory of Ukraine according to monitoring data of EGP. (2021). Kyiv: State Service of Geology and Bosom of Ukraine, State Research and Production Enterprise "State Geological Information Fund of Ukraine" [in Ukrainian].
6. Yatsik, A.V. (2003). Aquicultural ecology: in 4 vol., 7 books (Vol. 1, books 1-2). Kyiv: Genesis [in Ukrainian].
7. Dovgiy, S.O., Lyalko, V.I., Trofimchuk, O.M. et al. (2001). Informatization of aerospace physical geography. Kyiv: "Naukova dumka" [in Ukrainian].

8. Shestopalov, V.M., Trofimchuk, A.N., Luschik, A.V., & Yakovlev, E.A. (2006). Ecological and dynamic aspects of the regional increase of underground water level and soil overwetting influence on the decline of engineer and seismological safety of housing and industrial objects in Ukraine. In *Works of International scientific conference* (pp. 142-144). M.: Moscow state university [in Russian].
9. Trofimov, V.T., Korolev, V.A. (eds.). (2004). Engineering geology of loess rock arrays. M.: Moscow state university [in Russian].
10. Voznesenskiy, V.A., Kovalenko, V.G., Kushnareva, E.S., & Funikova, V.V. (2005). Dilution of soils under the cyclic loading. M.: Moscow state university [in Russian].
11. Yakovlev, E.O., Cherniy, V.G., & Shokarev, V.S. (2003). Analysis of soakage of loess soils of Ukraine and probabilistic estimations of spots of soakage parameters within the limits of the extended capital objects. *Ecology and resources*, 6, 124-129 [in Ukrainian].
12. Rudko, G.I. (2001). Technogenic ecological safety of geological environment (scientific and methodological bases). Lviv: the Publishing center of Lviv national university the name of I.Y. Franco [in Ukrainian].

The article was received 28.02.2023 and was accepted after revision 23.05.2023

Рогожин Олексій Георгійович

доктор економічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: 0000-0001-8101-9368 **e-mail:** olexarog@gmail.com

Яковлев Євген Олександрович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: 0000-0001-6562-4015 **e-mail:** yakovlevhydro@gmail.com

Крета Дмитро Леонідович

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

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

ORCID ID: 0000-0001-5897-0008 **e-mail:** dim.leo@gmail.com

UDC 504 ; 627.512 ; 556.5 + 004.942

Dmytro Stefanyshyn, D. S. (Engineering), Senior Research Scientist
ORCID ID: 0000-0002-7620-1613 *e-mail*: d.v.stefanyshyn@gmail.com

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

TESTING A NUMERICALLY-ANALYTICAL METHOD FOR PREDICTION DESIGN MAXIMA DISCHARGES OF FLOODS USING PLOTTING POSITION FORMULAS: THE RIVER UZH CASE, THE “UZHHOROD” GAUGING STATION DATA

***Abstract.** There are a lot of analytical probability distributions that might be used to predict peak discharges of floods. However, there is no proper theoretical or another similar justification for choosing an appropriate parametric probability distribution to predict peak discharges of floods by using observed data. As a permissible hypothesis, any of recommended probability distributions can be considered providing it meets the given statistical criteria and other considerations for the adequacy of simulation are taken into account. In turn, more than seventeen plotting position formulas have been proposed. They provide a non-parametric means to estimate the observed data probability distribution. Using a plotting position formula, a plot of the estimated values from a theoretical parametric probability distribution can be compared with the observed data.*

The choice of a better plotting position formula for fitting the different probability distributions has been discussed many times in hydrology and statistical literature. However, no specific criterion for choosing these formulas has been proposed yet. Perhaps there is no need for such a criterion. Maybe, the diversity of estimates that can be obtained due to these formulas matters more. Due to the diversity of the different plotting position estimates, from the point of view of informational entropy, different plotting position formulas enable revealing epistemic (non-stochastic or subjective) uncertainty in predictions of hydrological extremes.

Results of calculating empirical annual probabilities of exceedance observed maxima discharge employing various plotting position formulas show that increasing the predicting horizon toward low probable and more extreme events increases the divergence between the estimates obtained using the different plotting position formulas. Therefore, it is reasonable to assume that this divergence may be extrapolated to predict design maxima discharges of floods based on empirical estimates of plotting position probabilities.

This paper proposes a numerically-analytical method using such an extrapolation. It is based on using different plotting position formulas, numerical calculations of plotting position probabilities, and extrapolation of the divergence between the obtained estimates. The method is tested in predicting the maxima discharges of 0.5% and 1% annual probability of exceedance for the Uzh River flowing in the Transcarpathia region, the hydrological station “Uzhhorod” data.

Keywords: Annual probability of exceedance; divergence indicator; extrapolation; floods; numerically-analytical method; plotting position formulas; probability distributions; prediction; return period.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.138-162>

1. Introduction

Among natural disasters, riverine floods are the most common in terms of frequency, area of distribution, and losses in Ukraine [1, 2]. Annually, floods in rivers challenge people in the country because of damage to the infrastructure, losses of resources, and economy, personal property, crop losses, and threats to human health and life [3, 4].

Statistics show the annual average flood losses in the country in 1995-1998 amounted to more than UAH 900 million, in 1999-2007 more than UAH 1.5 billion, and in 2008-2010 – about UAH 6 billion [4]. From the year 2000, more than 280 emergency flood events occurred in Ukraine. Specific losses per one flood reached UAH 6,203,750 or EU 228,079; expenses for liquidation adverse consequences of one flood event – UAH 65,419,925 or EU 2,405,144 [4].

Most often, disastrous floods occur in the western regions of the country. In particular, on the Carpathian rivers [3, 5], floods are considered a common natural phenomenon [6]. So, one of the most destructive floods occurred in the Ukrainian Carpathians at the end of July 2008 [7]. The flood covered areas in Ukraine, Moldova, and Romania causing 47 fatalities and the evacuation of about 40,000 people. Then, over 40,000 houses and 33,000 ha of farmland were flooded in Ukraine [4]. It should be noted [8] the Ukrainian Carpathians and the Tisza River, Dniester, Prut, and Siret basins are among the most flood-prone regions in Europe and in the world. In addition, there is a threat of an increase in flood hazards in Ukraine in the future. In particular, it is associated with global and local climate change [6, 9], which is one of the topical problems in the country [10].

River floods will continue to challenge people harmfully [3]. They are the most common among repeatedly occurring natural disasters in the world [11]. However, river flooding is a natural hazard against which precautionary measures are most effective compared with other natural hazards [11, 12]. For centuries, people have managed river flood risks using specialised infrastructures, such as dams, river dykes and levees, drainage systems, and others, including so-called nature-based solutions [12-15]. In 2007, recognizing this, the European Union (EU) implemented the EU Flood Directive (Directive 2007/60/EC [16]). This Directive alleges that “Floods are natural phenomena which cannot be prevented”, as well as that “It is feasible and desirable to reduce the risk of adverse consequences, especially for human health and life, the environment, cultural heritage, economic activity and infrastructure associated with floods”. Nowadays, there are a lot of world and European regulatory practices in flood risk management, which have enabled the reduction of flood hazards using the reliable control of floods, infrastructure protection, and mitigation of the risk of adverse consequences [17]. Numerous data confirm the efficiency of the implementation of different flood control measures and flood risk management procedures [18-21]. In particular, the share of insured flood losses has become more notable in recent years. If only 12% of losses caused by flood events in 1980-2019 were insured [11], yet in 2021 some 22% of such losses were insured [22]. It should be noted that many flood losses relate to public infrastructure – roads, railways, dykes, riverbeds, and bridges, which are usually uninsured. Moreover, even in highly-developed industrial countries, the comparatively low share of insured flood losses has been partially due to a limited range of insurance covers in some regions and low demand, including locations well-known to be at risk of flooding [22].

However, the fixed rise in the share of insured flood losses may indicate more confidence from insurance companies in the quantitative assessment of flood risks and modern flood risk management procedures [23]. As a result, the overall trend in flood losses (after adjustment for increases in values) has fallen in Europe – despite repeated severe floods, such as those in 2002 and 2013 [24]. There are also indications in North America and China that protective measures have reduced adjusted flood losses [11, 23].

Today, Ukraine is at the stage of legal approximation to the EU Flood Risk Directive [4, 5]. In particular, according to the EU-Ukraine Association Agreement, the preparation of flood risk assessment procedures and flood hazard mapping should have been done by November 2020, and the Flood Risk Management Plans – by November 2022 [25]. However, these works are still not to be completed [4, 5, 25, 26].

Admittedly, in any field of human activity, one of the critical implementation challenges of effective risk management is an information problem [27]. More uncertainty is more risk. Savage (1954) argued that all uncertainties can be reduced to risk, converting risk assessment to the assessment of probabilities [28]. Therefore, the quantitative flood risk assessment will require the analysis and quantitative assessment of the probabilities (frequencies) of adverse or disastrous floods. Returning to the problem of flood risk management, it should be reminded that Directive 2007/60/EC [16] defines flood risk quantitatively as “the combination of the probability of a flood event and of the potential adverse consequences for human health, the environment, cultural heritage and economic activity associated with a flood event”.

In practice, according to Directive 2007/60/EC [16], the flood risk management projects' development and implementation requires estimating predicted flood water levels h_p corresponding to certain design annual probabilities of exceedance P (year^{-1}) or return periods $T_{r,p} = P^{-1}$ (years). For example, the design annual exceedance probabilities in terms of prediction of maximum water levels and possible inundation zones because of floods may be established at 0.005, year^{-1} (or 0.5%, year^{-1}), 1%, 2%, 5%, and 10%, or something else; the corresponding return periods of the design floods – 200, 100, 50, 20, and 10 years, etc. In hydrological investigations relating to river floods, these estimations are usually done by statistically analysing the frequency of flood peak discharges [29-33]. Practically, it is done in such a way. Direct annual maximum water levels' h (m) measurements at a near-located gauging (hydrological) station are converted into maxima annual discharges Q (m^3/s) by using a rating curve $Q = f(h)$ [7, 33]. As a result of long-term (not less than 30-40 years) uninterrupted hydrological measurements, time series of annual maximum water discharges of floods are formed. Gathered data are statistically analysed, and, in the frame of the stationary hypothesis, a relevant maxima annual discharges' probability distribution is chosen, which has to fit the observed data [29, 34, 35]. This probability distribution is used to derive a predicted peak discharge corresponding to a chosen design return period $T_{r,p}$ or a chosen design annual probability of exceedance P [33]. In the next step, the established peak discharge of a chosen design annual probability of exceedance may be used as the input value for the hydraulic modelling to derive the corresponding design flood level [33, 36], taking into account the current conditions with hydromorphological

characteristics of the river channel and floodplain [37]. As a result, possible inundation zones because of floods with different annual probabilities of exceedance (return periods) may be identified. This will allow providing measures to prevent and/or mitigate the flood hazard in flood-prone locations, to build or retrofit dams, dikes, levees, polders, and other hydraulic works, to assess the possible adverse consequences of flooding due to different floods, to carry out flood hazard mapping, and to assess the risks of damages as combinations of the probabilities of different flood events and the potential adverse consequences associated with these floods.

2. What can be wrong with the framework of this study?

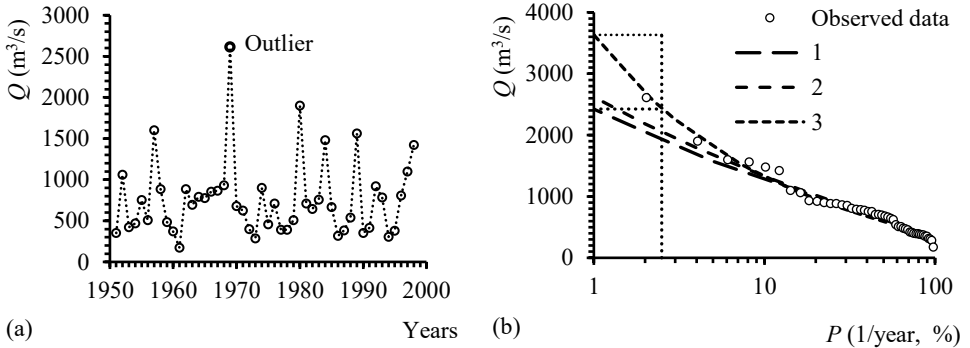
Many unsolved problems in hydrology can impact flood risk management policy [38]. One of these is the problem of how to take into account the non-stationary in hydrological predictions [39-42]. In current flood risk management projects, the observed hydrological data are considered and analysed in the frame of the stationary hypothesis. To take into account in the probabilistic modelling of flood frequency the non-stationary in hydrology, only some trivial corrections are usually proposed for the standard probability distributions. For example, this is the incorporation of trends in the parameters of the distributions, the incorporation of trends in statistical moments, or using the quantile regression method and the local likelihood method [40-42].

However, among different challenges and issues that can complicate the quantification of flood risks, there is a problem of recognising and overcoming two basic kinds of information uncertainty relating to hydrological predicting in the frame of the conventional stationary hypothesis in hydrology and water management: natural (stochastic) uncertainty and epistemic (non-stochastic or subjective) uncertainty [43]. It is quite possible that the increasing effort to develop and apply non-stationary models in hydrologic frequency analyses under changing environmental conditions can be frustrated if the additional uncertainty related to the non-stationary model complexity is accompanied by the sampling information uncertainty [44].

The natural or stochastic uncertainty stems from the essential variability of the river runoff stochastic process [43]. Available data can be insufficient to define the risk of extreme events more precisely [28]. Hydrological maxima are specific extreme events. In theory, they are not limited to the upper limit. Usually, time series of observed pick discharges hold an essential positive asymmetry (skewness); sometimes – strong outliers [29]. Often, expanding the observation periods increases the time series asymmetry (skewness) [29, 45]. That can complicate the choice of a relevant theoretical probability distribution.

Epistemic or non-stochastic uncertainty results from incomplete knowledge about the river runoff phenomena. Hydrologists are aware that the true probability distributions of maxima discharges of rivers are not being identified [28]. Different probability distributions can be fitted to the observed time series of annual maximum discharges, and these distributions can forecast various discharge values for a chosen annual probability of exceedance. Vice versa, the same water discharge value, depending on different probability distributions, can have various annual probabilities of exceedance [43, 45-49]. For example, as is shown in Fig. 1, depending on the probability distributions, the same annual exceedance probability of 1% corresponds to different values of water discharge maxima: 2425 m³/s for the

Three-parameter Krytskyi-Menkel distribution (KM3), 2622 m³/s for the Logarithmic Pearson type III distribution (LP3), and 3633 m³/s for the Logarithmic Extreme value type I distribution (LEV1) (Gumbel type I distribution for logarithms [47]). As is seen in Fig. 1, taking into account the observed outlier (2645 m³/s) using the LEV1 distribution affected prediction results significantly. The prediction uncertainty in predicting the discharge of 1% probability of exceedance ranged from 2425 m³/s to 3633 m³/s (relative prediction error up to 50%). In terms of annual probabilities of exceedance, the prediction uncertainty ranged from 1% to 2.5% (relative prediction error up to 150%).



Probability distributions: 1 – KM3 ($C_V = 0.6, C_S = 5 C_V$); 2 – LP3; 3 – LEV1; Observed data - obtained using the Weibull plotting formula

Fig. 1. Time series (a) and probability distributions of peak discharges (b) (The Stryi River, the Verkhnye Syn'ovydne gauge station, Ukraine) [47]

Many analytical probability distributions might be used in predicting peak discharges of floods [29, 34, 35, 50-52]. In the national standards regulating hydrological calculations, different countries recommend using different parametric probability distributions. Some of the most known standardized probability distribution function types adopted for frequency analysis of peak discharges in different countries are shown in Table 1.

Table 1. Standardized probability distribution function types used in frequency analysis of peak discharges of floods in different countries [53]

Recommended probability distribution function types	Country
Pearson type III distribution (P3)	China, Switzerland
Logarithmic Pearson type III distribution (LP3)	The US, Canada, India
Generalized extreme value distribution (GEV)	Great Britain, France
Two, Three parameters log-normal distribution (LN2, LN3)	Japan
Extreme value type I distribution (Gumbell type I, EV1)	Germany, Sweden, Norway
Extreme value type I, type III distribution (EV1, EV3)	Great Britain, France
Krytskyi-Menkel three-parameter distribution (KM3)	Ukraine, former USSR' countries

In general, there is no proper theoretical or another similar justification for choosing an appropriate probability distribution to predict peak discharges of floods using observed data [49]. Therefore, any of them might be considered a permissible hypothesis. For any probability distribution, which meets the given statistical criteria and other considerations for the adequacy of simulation [47, 54], it will hardly find a sufficiently weighty reason to reject it as a possible option indisputably.

However, there is one more challenge relating to the above question. The challenge is the choice of an unbiased empirical formula to plot the observed data. The attitude that the criterion for the choice of a desirable plotting position formula may be arbitrary is rebuked easily [55]. It should be noted, to date, more than seventeen different plotting position formulas have been proposed by hydrologists and statisticians [56].

As it is known, plotting position formulas provide a non-parametric means to estimate the observed data probability distribution. Using a plotting position formula, a plot of the estimated values from a theoretical parametric probability distribution can be compared with the observed data. In particular, probability plots allow a visual examination of the adequacy of the fit provided by alternative parametric probability distributions. For example, empirical probabilities of the observed peak discharges of the Stryi River at the Verkhnye Syn'ovydneye gauge station, which are shown in Fig.1 to examine the adequacy of the fit provided by three alternative parametric probability distributions (KM3, LP3 and the Gumbel type I distribution for logarithms), were calculated using the Weibull plotting position formula:

$$P_m = \frac{m}{n+1}, \tag{1}$$

where P_m is the empirical probability of exceedance of the m -th order observed value, m is the rank of the observed value, where the highest one being "1", and n is the number of observed statistics.

Probability papers and probability plotting positions to estimate observed data probability distributions were used by hydrologists as early as 1896 [57]. The first plotting position formula used in hydrological investigations was probably one proposed by Hazen (1914) [57]:

$$P_m = \frac{m-0.5}{n}. \tag{2}$$

Lebedev (1952) and Chegodaev (1965) proposed the use of

$$P_m = \frac{m-0.3}{n+0.4}, \tag{3}$$

which is approximately the median position advocated by Johnson (1951) [57].

In turn, Blom (1958) suggested

$$P_m = \frac{m - a}{n - 2 \cdot a + 1}, \tag{4}$$

where a is a constant (usually $0 \leq a \leq 1$), which defines possible plotting positions as special cases [57].

In this study, we took into account thirteen well-known plotting position formulas. They appear the most frequently in the hydrological literature [29, 55-62]. These formulas are shown in Table 2.

Table 2. Plotting position formulas used in the study

No	Author (year)	Formula to calculate P_m	Recommended probability distributions
1	Hazen (1914)	$\frac{m - 0.5}{n}$	GEV, Gumbell type I (EV1)
2	Gringorten (1963)	$\frac{m - 0.44}{n + 0.12}$	GEV, Gumbell type I (EV1)
3	Nguyen et al. (1989)	$\frac{m - 0.42}{n + 0.3C_S + 0.05}$, C_S is skewness	P3, $-3 \leq C_S \leq 3$, and $5 \leq n \leq 100$
4	Cunnane (1978)	$\frac{m - 0.4}{n + 0.2}$	GEV, EV3, P3, LP3
5	Blom (1954)	$\frac{m - 3/8}{n + 1/4}$	LN2, LN3, LP3
6	Hosking (1990)	$\frac{m - 0.35}{n}$	Some 3-parameter distributions
7	Tukey (1962)	$\frac{m - 1/3}{n + 1/3}$	All distributions
8	Goel (1993)	$\frac{m - 0.02C_S - 0.32}{n - 0.04C_S + 0.36}$	GEV
9	Beard (1945)	$\frac{m - 0.3175}{n + 0.365}$	All distributions
10	Kim et al. (2012)	$\frac{m - 0.32}{n + 0.0149C_S^2 - 0.1364C_S + 0.3225}$	GEV
11	Lebedev (1952), Chegodaev (1965)	$\frac{m - 0.3}{n + 0.4}$	GEV, EV3, P3, LP3, KM3
12	Adamowski (1985)	$\frac{m - 0.25}{n + 0.5}$	EV1, GEV, EV3
13	Weibull (1939)	$\frac{m}{n + 1}$	All distributions

Table 2 also shows which plotting position formula can be the best to fit different parametric probability distributions. It should be noted that the choice of the best plotting position formula for fit to the different probability distributions has been discussed many times in hydrology and statistical literature [55-62]. However, a more worthwhile criterion for choosing plotting position formulas might be based on obtained empirical estimates of plotting position probabilities. It might be better

than a comparison of empirical plotting position probabilities with the theoretical probabilities to test individual probability distributions. Eventually, we will know which theoretical probability distribution is better in a contest of obtained estimates of future events only after these events happen. However, in terms of decision-making, we may consider all recommended plotting position formulas as admissible options to test each of recommended theoretical probability distributions and choose the best one.

This paper proposes a new numerically-analytical method to predict the design maxima discharges of floods using empirical estimates of plotting position probabilities obtained by different plotting position formulas. The proposed method is tested on a fragment of a time series of the maximum discharges of the Uzh River, the Tisza River basin, Transcarpathia region, observed at the hydrological station (HS) “Uzhhorod”.

3. Case study and objectives of this paper

The Uzh River belongs to the Tisza river basin, originates in the mountains in the northwest of the Transcarpathia region of Ukraine, and flows into the Laborec River in eastern Slovakia. The major part of the Uzh basin is in Ukraine (Fig. 2). The river length is 132.4 km, and its catchment area is 2,790.9 km² [63] (in Ukraine 112.8 km and 1,970 km²) [64, 65]. In the upper reaches, Uzh has a pronounced mountainous character (slopes of the river channels 5-20 m/km). Its lower parts belong to the lowland (bed slopes of 2-0.3 m/km or less [63]).

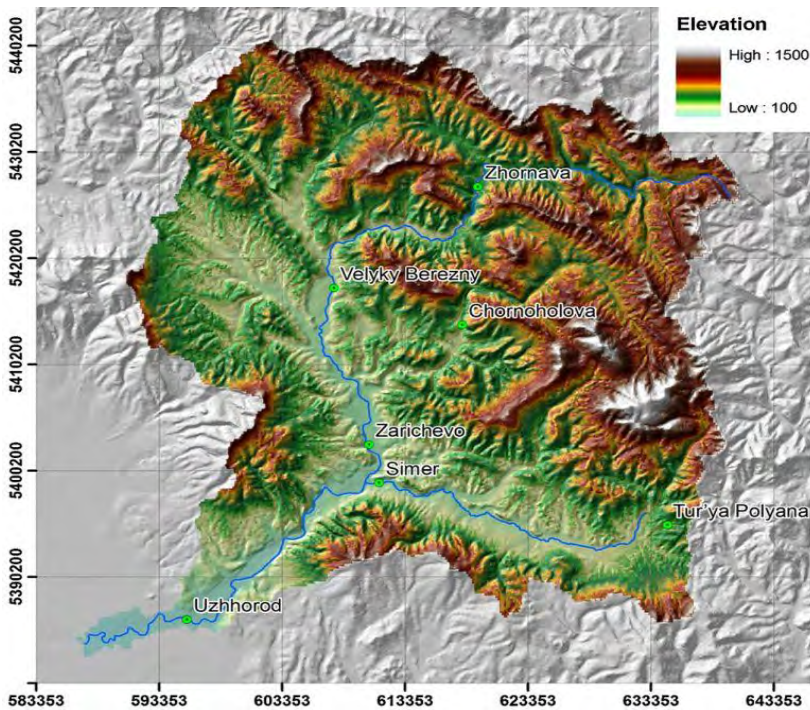


Fig. 2. The Uzh River watershed and catchment topography; coordinates are in UTM, 34 N zone (taken from [64])

In the lowlands, Uzh flows within the city of Uzhhorod – the administrative centre and the largest town (125,000 inhabitants) of the Transcarpathia region. The river width is mainly 15-30 m; near Uzhhorod, it reaches up to 135 m. The river valley width varies from 15 m in the upper reaches to 100-300 m in the downstream, and in the lowlands, it reaches 2-2.5 km. The river banks are steep, 1-2 m high, sometimes up to 6-8 m, the river bottom in the upper and middle reaches is rocky, and in Uzhhorod and downstream, it is silted up [65].

The runoff of the Uzh River is very variable. It is only about 29.6 m³/s of the mean annual water discharge near Uzhhorod [65, 66], a minimum 7-day summer-autumn flow can decrease below 2 m³/s [67], but a maximum peak one can exceed 1,000 m³/s and more during floods. The Uzh River is known for its heavy snowmelt and rain flash floods, which can occur 3-8 times per year. Admittedly, catastrophic floods are an inherent element of the hydrological regime of rivers in the Transcarpathia [68] and the Uzh River basin is one of the most flood-prone river basins of Ukraine [64]. Floods in the Uzh basin were recorded in all seasons of the year and can be showery, snowy and snow-flurry by origin; the most significant floods are formed in the cold seasons (late autumn, winter, and early spring) but they occur also in the summer season, the phenomenon is being influenced by the moisture intake brought by the air masses [25]. Among months, the richest ones for water are January, March and November [25].

Six hydrometeorological gauging stations are in the Uzh basin on Ukrainian territory. Measurements have taken place for more than 10 years [64]. These gauging stations belong to Joint Ukrainian-Hungarian Automated Information-Measuring System for flood forecasting and management in the Tisza River basin in the Transcarpathian region (AIMS TISZA) [69, 70]. They measure precipitation, temperature, water levels, and discharges [64]. Additionally, the Zhornava station measured flood discharges from 1952, the Zarichevo station – from 1947, and the Uzhhorod hydrological station (HS “Uzhhorod”) – from 1947.

This case study relates to peak water discharges measured at the HS “Uzhhorod”. **The objectives of this paper are:** (1) to develop a numerically-analytical method for prediction of design maxima discharges of floods using empirical estimates of plotting positions; (2) to test the method when making predictions of maxima discharges of 0.5%, and 1% annual exceedance probabilities using a fragment of a time series of the observed data for the Uzh River, the hydrological station (HS) “Uzhhorod”.

4. Materials and methods

A time series of maximum discharges of the Uzh River, which were observed at the hydrological station (HS) “Uzhhorod” from 1947 to 1999 (Fig. 3), was employed in this study. The data were taken from the Hydrological Yearbooks of the Central Geophysical Observatory named after B. Sreznovsky [71].

The data sample length is 53 years. The maximum observed peak discharge value within the data sample is 1680 m³/s (1957); the minimum value is 146 m³/s (in 1961). The mean peak discharge within the data sample is 689 m³/s; the sample standard deviation – of 364 m³/s. The coefficient of variation of the time series C_V is 0.53, the skewness C_S – of 0.52, and the C_S / C_V is 0.99.

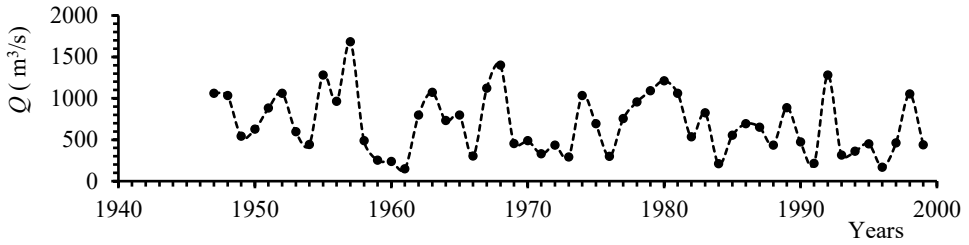


Fig. 3. Time series of annual maximum water discharges, the Uzh River, HS “Uzhgorod”, the data sample of 1947-1999

In the study, the following methods were used: (1) generalised scientific methods of theoretical and empirical research, analysis and synthesis, expert evaluation and comparison, formalization and modelling, and extrapolation methods [45, 72]; (2) fundamental methods of probability theory and mathematical statistics, and risk theory [28, 55, 57], in particular, regarding risk assessment and management [27, 31, 32]; (3) specific statistical methods in hydrology [29, 34, 35, 50-52, 59]; (4) utility theory methods [73, 74] and decision making methods under risk and uncertainty [43, 45, 75, 76].

Thirteen plotting position formulas were used in the study. These are shown in Table 2. The plotting position formulas were considered in terms of possible expert suggestions for assessing the annual empirical probabilities of exceedance of observed maxima discharges. As possible theoretical alternatives for predicting design maxima discharges of the Uzh River at the HS “Uzhhorod” considered were five probability distributions (Fig. 4): 1) the Kritskyi-Menkel three-parameter distribution (KM3) ($C_V = 0.53, C_S = C_V$); 2) Pearson’s type III distribution (P3) ($C_S = 0.52$); 3) the Extreme value type I distribution (Gumbell’s type I distribution, EV1); 4) the Logarithmic Pearson type III distribution (LP3) ($C_S = -0.44$); and 5) the Two parameters logarithmic-normal distribution (LN2).

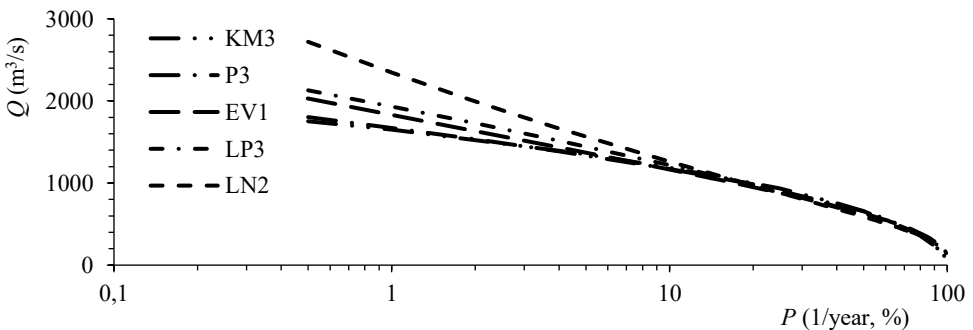


Fig. 4. Alternative parametric probability distributions of annual maxima discharges of the Uzh River at the HS “Uzhhorod” for the data sample of 1947-1999

The population parameters of the parametric probability distributions (Fig. 4) were estimated from the sample statistics by the method of moments; the sample characteristics were equated to the population parameters.

5. Data pre-analysis and several preliminary summarising remarks

The data pre-analysis included calculating empirical annual probabilities of exceedance P_m observed maxima discharge employing various plotting position formulas depending on the rank $m = 1, \dots, n$ of the observed value, where the highest one has the rank $m = 1$, and $n = 53$ is the number of observed data. Fig. 5 shows the results of the calculations using the six most-cited formulas (Hazen, Gringorten, Blom, Tukey, Chegodaev, and Weibull). Fig. 6 shows the Hazen, Chegodaev, and Weibull plot positions in comparison with the chosen alternative parametric probability distributions. Below, Table 3 shows the results of the calculations of empirical probabilities of exceedance for the six maxima discharges ($m = 1, 2, 3, 5, 6$, and 12) employing all taken into account (thirteen, See Table 2) plot position formulas.

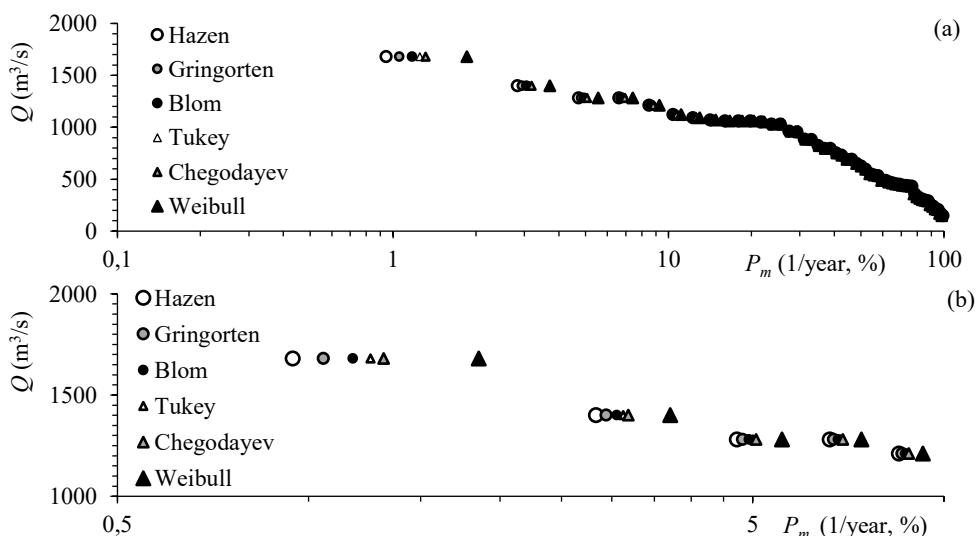


Fig. 5. Empirical probabilities of exceedance P_m according to plotting positions: (a) within 0.1-100%; (b) within 0.5-10%; annual maxima discharges of the Uzh River, the HS “Uzhhorod”, the data sample of 1947-1999

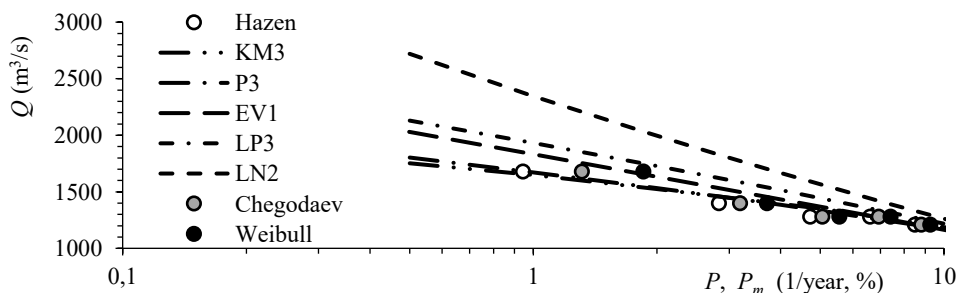


Fig. 6. Hazen’s, Chegodaev’s, and Weibull’s plot positions in comparison with the chosen alternative parametric probability distributions

Table 3. Empirical probabilities of exceedance P_m for the observed maxima discharges of 1680, 1400, 1280, 1210, 1120, and 1050 m³/s ($m = 1, 2, 3, 5, 6,$ and 12) depending on the different plotting position formulas

No	Plotting position formula (author)	P_m (1/year, %)					
		$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 5$	$m = 6$	$m = 12$
		1680	1400	1280	1210	1120	1050
1	Hazen	0.94	2.83	4.72	8.49	10.38	21.70
2	Gringorten	1.05	2.94	4.82	8.58	10.47	21.76
3	Nguyen et al.	1.09	2.97	4.85	8.61	10.49	21.76
4	Cunnane	1.13	3.01	4.89	8.65	10.53	21.80
5	Blom	1.17	3.05	4.93	8.69	10.56	21.83
6	Hosking	1.23	3.11	5.00	8.77	10.66	21.98
7	Tukey	1.25	3.13	5.00	8.75	10.63	21.88
8	Goel	1.26	3.13	5.00	8.75	10.63	21.88
9	Beard	1.28	3.15	5.03	8.77	10.65	21.89
10	Kim et al.	1.28	3.15	5.03	8.79	10.67	21.93
11	Chegodaev	1.31	3.18	5.06	8.80	10.67	21.91
12	Adamowski	1.40	3.27	5.14	8.88	10.75	21.96
13	Weibull	1.85	3.70	5.56	9.26	11.11	22.22

It can be easily noted that increasing the predicting horizon toward low probable and more extreme events increases the difference (or divergence) between the estimates of probabilities obtained using the different parametric probability distributions and the different plotting position formulas.

For estimates calculated employing the different plotting position formulas (Table 3), we tried to quantify this difference using the parameter, which was named the divergence indicator d_m :

$$d_m = \frac{P_m(W)}{P_m(H)}, \text{ or } d_m = \frac{T_{r,m}(H)}{T_{r,m}(W)}, \quad (5)$$

where $m = 1, 2, 3, 5, 6,$ and 12 is the rank of the observed maxima discharges of 1680, 1400, 1280, 1210, 1120, and 1050 m³/s; $P_m(W)$, $P_m(H)$ are the empirical probabilities of exceedance, and $T_{r,m}(W)$, $T_{r,m}(H)$ are the return periods of the observed maxima discharges calculated using the Weibull (1) and Hazen (2) plotting position formulas, correspondingly.

The results of the divergence indicator calculations are shown in Table 4 and Fig. 7. In particular, Fig. 7 shows two dependencies relating to the indicator d_m : (a) between the discharges' return periods calculated using the Weibull and Hazen formulas and the divergence indicator; (b) between the indicator d_m and the observed peak discharges.

Table 4. Divergence indicator d_m values for empirical probabilities obtained by the Weibull and Hazen plotting position formulas

Plotting position formula (author)	Q_m (m ³ /s); P_m (1/year, %) \ $T_{r,m} = 100 \cdot P_m^{-1}$ (years)					
	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 5$	$m = 6$	$m = 12$
	1680	1400	1280	1210	1120	1050
Weibull	1.85 \ 54	3.70 \ 27	5.56 \ 18	9.26 \ 11	11.11 \ 9	22.22 \ 5
Hazen	0.94 \ 106	2.83 \ 35	4.72 \ 21	8.49 \ 12	10.38 \ 10	21.70 \ 5
d_m	1.96	1.31	1.18	1.09	1.07	1.02

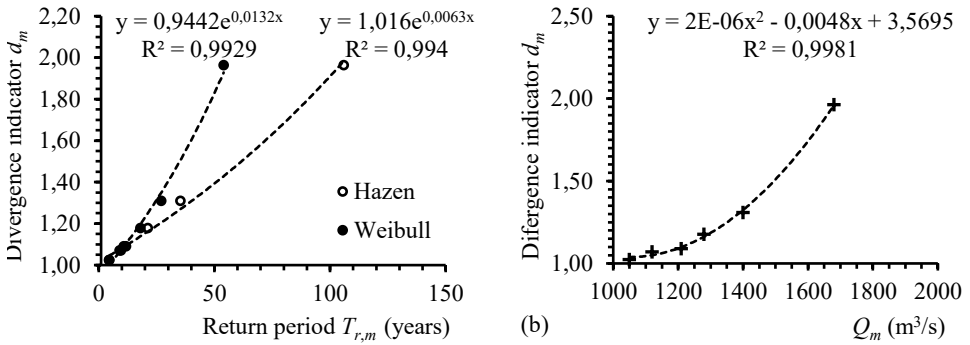


Fig. 7. Dependencies: (a) between the discharge return period $T_{r,m}$ and the divergence indicator d_m ; (b) between the observed peak discharge Q_m and the indicator d_m

Summarising, several preliminary remarks can be made.

The first remark concerns the events with short return periods. The different plotting position formulas provide nearly similar results. These events have return periods of 5 years or less in this case study. The annual probabilities of exceedance are 20% and more. The same conclusion applies to the chosen alternative parametric probability distributions (Fig. 4).

The second remark relates to the difference in the empirical estimates of the probability of exceedance provided by different plotting position formulas. This difference increases as the frequency of the occurred events decreases (See Fig. 5, 6, and Table 3). The same conclusion applies to the probabilities of exceedance for future events, the estimates that the alternative parametric probability distributions predict (Fig. 4).

The third remark concerns choosing a better parametric probability distribution among possible alternatives. Plot position formulas can influence the decision and, accordingly, the prediction of the design peak discharge value of a given small probability of exceedance. For example, visually (See Fig. 6), the Hazen plotting position formula compels us to pay attention to the Kritskyi-Menkel three-parameter generalised gamma distribution (KM3) and Pearson's type III distribution (P3); the Chegodaev formula indicates the Extreme value type I distribution (Gumbell's type I distribution, EV1); eventually, the Weibull formula does not exclude employing the Logarithmic Pearson type III distribution (LP3).

The regressions $d_m = f(T_{r,m})$ (See Fig. 7a) indicate that further enlarging of the return period of the observed peak discharge may correspond to an increase in the divergence in plotting position estimates the different formulas provide. This divergence depends on the plotting position formulas chosen to be compared. The regression $d_m = f(Q_m)$ (See Fig. 7b) indicates that further enlarging of the observed peak discharge may also correspond to an increase in the divergence in plotting position estimates the different formulas provide. By estimating the divergence indicator and building these regressions, we can provide predictions based on extrapolation. In the first step, the prediction is implemented using the direct dependencies between the divergence indicator values and the design discharge return period values. In the second step, it is used the dependence between the discharges and the divergence indicator values. Predicting design discharges is made using an iterative calculation method.

6. Developing and testing the proposed method

6.1. Technique to apply the method

Fig. 8, and Table 5 show results of predicting the design maxima discharge of 1% and 0.5% annual probability of exceedance for the Uzh River, the HS “Uzhhorod”. These predictions were based on empirical probabilities obtained by the Weibull and Hazen plotting position formulas.

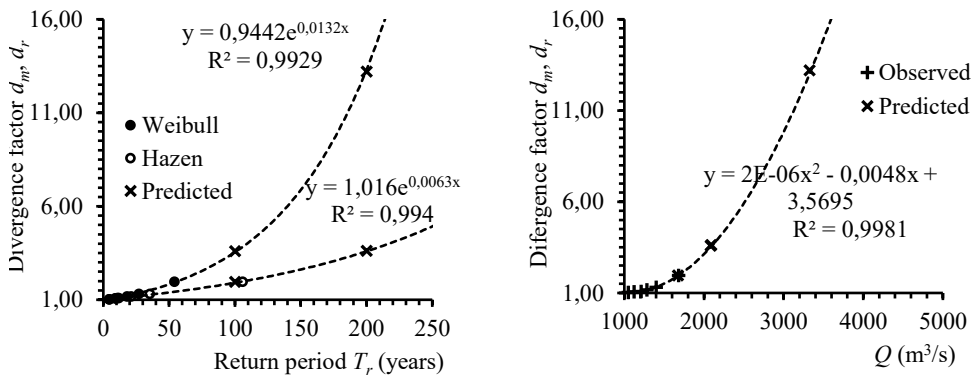


Fig. 8. Predicting the design maxima discharges of 1% and 0.5% annual probabilities of exceedance for the Uzh River, the HS “Uzhhorod”

Table 5. Results of predicting the design maxima discharges of 1% and 0.5% annual probabilities of exceedance for the Uzh River, the HS “Uzhhorod”

P (1/year, %)	$T_r = 100 \cdot P^{-1}$ (years)	Design maxima discharge Q (m ³ /s) according to:	
		Hazen	Weibull
1	100	1670	2080
0.5	200	2090	3323

Fig. 9 shows the predicted values of the design maxima discharges of the 1% and 0.5% annual probabilities of exceedance. The prediction results are compared with the chosen alternative parametric probability distributions.

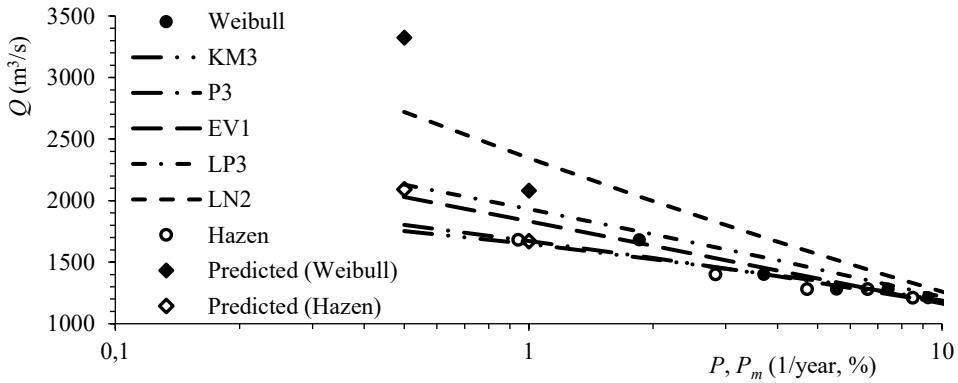


Fig. 9. Predicted values of the design maxima discharges of the 1% and 0.5% annual probabilities of exceedance in comparison with the chosen alternative parametric probability distributions (the Uzh River, the HS “Uzhhorod”)

It is suggested the following technique to apply the proposed numerically-analytical method for prediction design maxima discharges of floods using empirical estimates of plotting positions.

Stage 1: Preparation of a time series of maximum water discharges;

Stage 2: Reviewing different plotting position formulas;

Stage 3: Calculating empirical annual probabilities of exceedance P_m (1/year, %) of observed maxima discharges employing chosen plotting position formulas depending on the rank $m = 1, \dots, n$ of the observed discharge values, where the highest one has the rank $m = 1$, and n is the number of observed discharges;

Stage 4: Choosing a plotting position formula (formulas) for prediction design maxima discharges;

Stage 5: Choosing a counterparty plotting position formula (formulas) to calculate the divergence indicator d_m values; the counterparty plotting position formula may be chosen as an arbitrary one; it may be one of the formulas providing marginal (maximum, minimum) plotting positions (for example, Hazen’s or Weibull’s formulas);

Stage 6: Computing the divergence indicator d_m values;

Stage 7: Choosing a population of plot positions ($m = 1, \dots$) for which $d_m > 1$ and building the regression $d_m = f(T_{r,m})$; predicting the divergence indicator $d_r = f(T_r)$ for the chosen design return period T_r of the design maxima discharge by using the extrapolation method;

Stage 8: Building the regression $d_m = f(Q_m)$; predicting the design maxima discharge for the chosen design return period $T_r = 100 \cdot P^{-1}$, where P is a chosen design annual probability of exceedance (1/year, %), by using the extrapolation and iterative calculation methods.

6.2. Using the Fishburne rule

Results obtained by using different plotting position formulas may be considered expert estimates. These expert estimates may be given different importance in making decisions under uncertainty and risk [73-76]. For example, in flood management strategies, the plotting position estimates obtained using the Weibull formula contribute to choosing more cautious decision options. However, more cautious solutions may be associated with higher capital costs. In turn, the plotting position estimates obtained by Hazen's formula contribute to choosing decision options with lower capital costs. However, these less costly decision options may inflict increasing in future flood losses.

Accordingly, making decisions, different plotting position formulas can be considered indicators of the predisposition to more cautious or less expensive decision options. In other words, different plotting position estimates obtained using different plotting position formulas can acquire their weight level in a system of indicators' importance under the decision-making process.

An optimal distribution of the weights of the indicators from the point of view of informational entropy is referred to as Fishburne's rule. The Fishburne rule considers that the level of indicators' importance is determined only by arranged in descending order of importance.

According to the Fishburne rule, the "weight" w_i for the i -th plotting position estimate $P_{m,i}$ obtained using the i -th formula can be calculated as [73, 74]:

$$w_i = \frac{2(k-i+1)}{(k+1) \cdot k}, \quad (6)$$

where i is the rank of the i -th plotting position estimate obtained using the i -th formula taking into account the level of the formula importance; the highest estimate gets the rank $i = 1$ when there is a predisposition to more cautious options, and vice-versa, when there is a predisposition to options with lower capital costs, the smallest one has the rank $i = k$; k is the total number of the ranked-set plotting position estimates (formulas).

Then, the rank-weighted estimate of the annual plotting position probability $P_{m,w}$ depending on the selected significance option of the different plotting position formulas

$$P_{m,w} = \sum_{i=1}^k P_{m,i} \cdot w_i, \quad (7)$$

where m is the rank of the observed peak water discharge Q_m (m^3/s).

Using the Fishburne rule enables getting two possible rank-weighted estimates of the annual plotting position probability $P_{m,w}$ depending on the selected significance option of the different plotting position formulas: the rank-weighted upper bound estimate (sup) $P_{m,w}^{\text{sup}}$, the rank-weighted lower bound estimate (inf) $P_{m,w}^{\text{inf}}$. The rank-weighted upper bound estimate $P_{m,w}^{\text{sup}}$ corresponds to the predisposition to more

cautious decision options. The rank-weighted lower bound estimate $P_{m,w}^{inf}$ corresponds to the predisposition to less expensive decision options.

For $k = 13$, the following weights of the i -th different plotting position estimates (formulas) were obtained depending on their rank: ($i = 1, w_1 = 0.143$); (2, 0.132); (3, 0.121); (4, 0.110); (5, 0.099); (6, 0.088); (7, 0.077); (8, 0.066); (9, 0.055); (10, 0.044); (11, 0.033); (12, 0.022); ($i = 13, w_{13} = 0.011$).

Table 6 shows the calculated parameters, where the divergence indicator $d_m = P_{m,w}^{sup} / P_{m,w}^{inf}$, the return periods: $T_{r,m}^{sup} = 100 / P_{m,w}^{sup}$, $T_{r,m}^{inf} = 100 / P_{m,w}^{inf}$.

Table 6. The rank-weighted upper bound $P_{m,w}^{sup}$ and lower bound $P_{m,w}^{inf}$ estimates for empirical probabilities of observed maxima discharges

Parameters	Observed maxima discharge Q (m ³ /s)					
	1680	1400	1280	1210	1120	1050
m	1	2	3	5	6	12
$P_{m,w}^{sup}$ (%)	1.35	3.22	5.09	8.84	10.71	21.95
$P_{m,w}^{inf}$ (%)	1.15	3.03	4.91	8.67	10.55	21.82
d_m	1.168	1.061	1.036	1.019	1.015	1.006
$T_{r,m}^{sup}$ (years)	74	31	20	11	9	5
$T_{r,m}^{inf}$ (years)	87	33	20	12	9	5

Below, Fig. 10 and Table 7 show the predicted values of the design maxima discharges of 1% and 0.5% annual probabilities of exceedance for the Uzh River, the HS “Uzhhorod”. They were obtained according to the data in Table 6. Fig. 11 compares the obtained prediction results with the chosen alternative probability distributions.

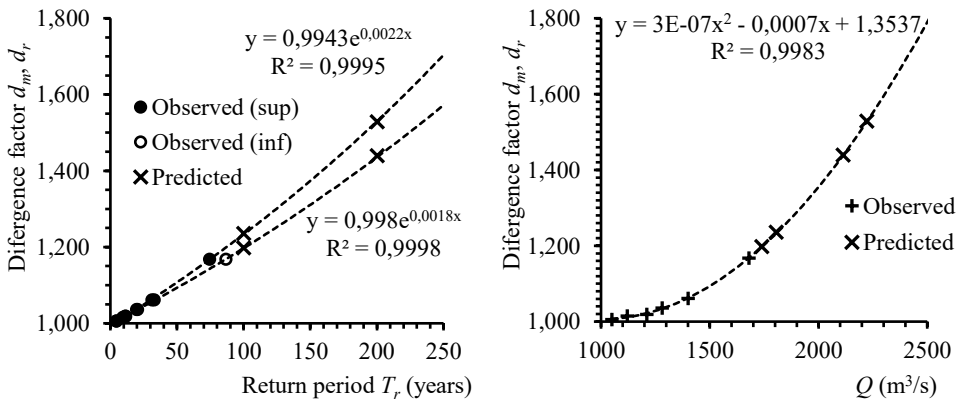


Fig. 10. Predicting the design maxima discharges of 1% and 0.5% annual probabilities of exceedance for the Uzh River, the HS “Uzhhorod”, according to data in Table 6

Table 7. Results of predicting the design maxima discharges of 1% and 0.5% annual probabilities of exceedance for the Uzh River, the HS “Uzhhorod”, using the Fishburne rule

P (1/year, %)	$T_r = 100 \cdot P^{-1}$ (years)	Design maxima discharge Q (m ³ /s) obtained using the Fishburne rule	
		inf	sup
1	100	1738	1805
0.5	200	2113	2222

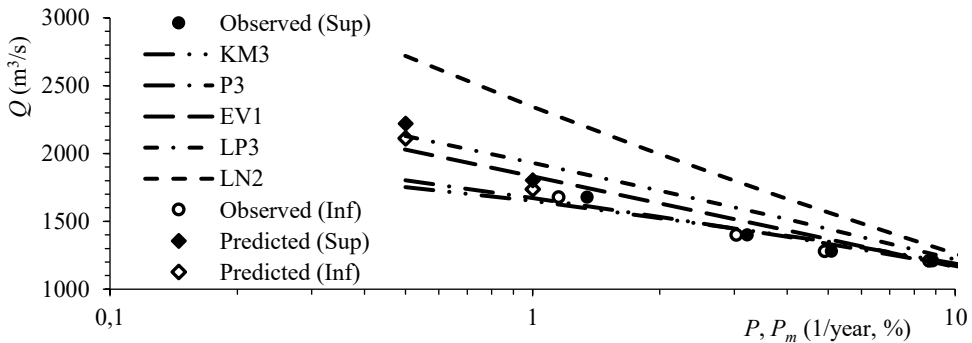


Fig. 11. Comparison of the obtained prediction results (Table 7) with the chosen alternative parametric probability distributions

It is worth noting the goodness of fit of the peak discharges of 1% probability of exceedance obtained by extrapolation of plotting position probabilities using the proposed method to the Extreme value type I distribution (Gumbell type I, EV1). The design discharge of 1% probability of exceedance obtained using the EV1 distribution is 1832 m³/s. The upper bound estimate (sup) of such a discharge using the proposed method and the Fishborn rule is 1805 m³/s. The relative prediction error is less than 1.5%. The lower bound estimate (inf) of such a discharge using the proposed method and the Fishborn rule is 1738 m³/s. The relative prediction error is 5.4%. However, it is worth noting the goodness of fit of the peak discharges of 0.5% probability of exceedance obtained by extrapolation of plotting position probabilities using the proposed method to the Logarithmic Pearson type III distribution (LP3). The design discharge of 0.5% probability of exceedance obtained using the LP3 distribution is 2130 m³/s. The upper bound estimate (sup) of such a discharge using the proposed method and the Fishborn rule is 2222 m³/s. The relative prediction error is approximately 4.2%. The lower bound estimate (inf) of such a discharge using the proposed method and the Fishborn rule is 2113 m³/s. The relative prediction error is less than 0.8%.

7. Some discussion remarks

Is epistemic or non-stochastic uncertainty a challenge in predicting extreme hydrological characteristics? Yes, it is. It can be a challenge. However, at least, the multi-model approach may promote revealing epistemic uncertainty.

To answer this question, an original method of prediction was developed. The method was called a numerically-analytical method. It is based on using different plotting position formulas, numerical calculations of plotting position probabilities, and extrapolation of the divergence between the obtained estimates.

This method may support to choice of a better parametric probability distribution. There is no proper theoretical or another similar justification for choosing an appropriate probability distribution to predict peak discharges of floods using observed data. This method may promote such a justification.

The estimates predicted by this method are also noteworthy. In terms of predicting accuracy, these estimates are no different principally from estimates that can be obtained using parametric probability distributions.

Conclusions

1. Plotting position formulas provide a non-parametric means to estimate the observed data probability distribution. Using a plotting position formula, a plot of the estimated values from a theoretical parametric probability distribution can be compared with the observed data. It allows a visual examination of the adequacy of the fit provided by alternative parametric probability distributions.

2. There are more than seventeen different plotting position formulas to fit theoretical parametric probability distributions with the observed data. The issue is the choice of an unbiased empirical formula to plot the observed data. Any plotting position formula can be an option for fitting parametric probability distributions.

3. Results of calculating empirical annual probabilities of exceedance observed maxima discharge employing various plotting position formulas show that increasing the predicting horizon toward low probable, more extreme events increases the divergence between the estimates obtained using the different plotting position formulas. It is reasonable to assume that this divergence may be extrapolated.

4. An original numerically-analytical method is developed to predict design maxima discharges of floods using empirical estimates of plotting positions. It is based on using different plotting position formulas, numerical calculations of plotting position probabilities, and extrapolation of the divergence between the obtained estimates. The method is tested in predicting the maxima discharges of 0.5% and 1% annual probability of exceedance for the Uzh River, the hydrological station (HS) "Uzhhorod".

5. Among the practically significant results of the study, the following ones should be highlighted. The upper bound estimate (sup) of the design peak discharge of 1% probability of exceedance obtained by extrapolation of plotting position probabilities using the proposed method and the Fishborn rule is 1805 m³/s. It fits the estimate of 1832 m³/s derived from the Extreme value type I distribution (Gumbell type I, EV1). The upper bound estimate (sup) of the design peak discharge of 0.5% probability of exceedance using the proposed method and the Fishborn rule is 2222 m³/s. It fits the estimate of 2130 m³/s derived from the Logarithmic Pearson type III distribution (LP3). Thus, depending on different design probabilities of exceedance, the proposed method may support the choice of a better parametric probability distribution to predict peak discharges.

REFERENCES

1. Ukraine – Vulnerability. Climate Change Knowledge Portal. Available from <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/ukraine/vulnerability>.
2. Flood protection of territories. United Nations Development Programme. UNDP in Ukraine. Available from <https://www1.undp.org/content/dam/ukraine/docs/EE/Flood>.
3. Stefanyshyn, D.V. (2022). What could we have learnt from the previous flood data to predict losses caused by the 1980, 1986, and 1998 catastrophic floods in Ukrainian Transcarpathian? *Environmental safety and natural resources*, 43(3), 81–109; <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.81-109>.
4. Ryabchenko, O., Snizhko, S., and Trypolska, G. (2020). Ukraine. Technology needs assessment for climate change adaptation. Barrier analysis and enabling framework. Report. Project: Technological Needs Assessment under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 171 p.
5. Danko, K., Nabyvanets, Yu., Filippova, Yu., Korniienko, V., Lobodzinskyi, O., Surai, K., Malyshev, A., and Kostiantyn Sokolchuk, K. (2019). Steps to implement Directive 2007/60/EC in Ukraine and preliminary flood risk assessment. Available from https://uhmi.org.ua/conf/danube_conference_2019/presentations/.
6. Didovets, I., Lobanova, A., Bronstert, A., Snizhko, S, Fox Maule, C, and Krysanova, V. (2017). Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Three Representative Ukrainian Catchments Using Eco-Hydrological Modelling. *Water*, 9, 204; <https://doi.org/10.3390/w9030204>.
7. Stefanyshyn D.V., Korbutiak V.M., Stefanyshyna-Gavryliuk Y.D. (2019). Situational predictive modelling of the flood hazard in the Dniester river valley near the town of Halych. *Environmental safety and natural resources*, Issue 1 (29), 16–27; <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.1.16-27>.
8. Susidko, M.M., and Lukyanets, O.I. (2004). Zoning of the territory of Ukraine according to the degree of hydrological danger. *UkrNDGMI*, Issue 253, 196–204. (In Ukrainian) [Сусідко М.М., Лук'янець, О.І. (2004). Районування території України за ступенем гідрологічної небезпеки. *УкрНДГМІ*, Вип. 253, 196–204].
9. Didovets, Iu., Krysanova, V., Bürger, G., Sergiy Snizhko, S., Balabukh, V., and Bronstert, A. (2019). Climate change impact on regional floods in the Carpathian region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22, 100590; <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.01.002>.
10. Climate Landscape Analysis for Children (CLAC) in Ukraine. (2021). UNICEF, Hydroconseil, 156 p. Available from <https://www.unicef.org/ukraine/media/15766>.
11. Munich Re's NatCatSERVICE – The natural catastrophe loss database. Data on natural disasters since 1980. Available from <https://www.munichre.com/en/solutions/reinsurance-property-casualty/natcatservice.html>.
12. McBain, W., Wilkes, D., and Retter M. (2010). Flood resilience and resistance for critical infrastructure. CIRIA C688. London, 134 p.
13. Joyce, J., Chang, N. Bin, Harji, R., Ruppert, T. (2018). Coupling infrastructure resilience and flood risk assessment via copulas analyses for a coastal green-grey-blue drainage system under extreme weather events. *Environ. Modelling Software*. 100, 82–103; <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.008>.
14. Sahani, J., Kumar, P., Debele, S., Spyrou, Ch., Loupis, M., Aragão, L., Porcù, F., Rahman Shah, M.A., and Di Sabatino, S. (2019). Hydro-meteorological risk assessment methods and management by nature-based solutions. *Science of The Total Environment*, Vol. 696, 133936; <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133936>.
15. Debele, S.E., Kumar, P., Sahani, J., et al. (2019). Nature-based solutions for hydro-meteorological hazards: Revised concepts, classification schemes and databases. *Env. Research*, Vol. 179, Part B, 108799; <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108799>.

16. Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks. (2007). Official Journal of the European Union, L288/27, 8 p. Available from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0060&from=EN>.
17. Effectiveness of flood management measures. (2015). Integrated flood management tools series, Issue 21. World Meteorological Organization and the Global Water Partnership, 66 p. Available from <https://www.floodmanagement.info/publications/tools>.
18. Salazar, S., Francés, F., Komma, J., Blume, T., Francke, T., Bronstert, A., and Blöschl, G. (2012). A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of “retaining water in the landscape” in different European hydro-climatic regions. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3287–3306; <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3287-2012>.
19. Hudson, P., Botzen, W.J.W., Kreibich, H., Bubeck, P., and Aerts, J.C.J.H. Evaluating the effectiveness of flood damage mitigation measures by the application of propensity score matching (2014). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1731–1747; <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1731-2014>.
20. Kron, W., and Müller, O. (2019). Efficiency of flood protection measures: selected examples. *Water Policy* 21(6), 449–467; <https://doi.org/10.2166/wp.2019.023>.
21. Tariq, M.A.U.R., Farooq, R., and van de Giesen, N. (2020). A Critical Review of Flood Risk Management and the Selection of Suitable Measures. *Appl. Sci.*, 10, 8752; <https://doi.org/10.3390/app10238752>.
22. Munich Re. Flood risks on the rise. Underestimated natural hazard, devastating damage. Available from <https://www.munichre.com/en/risks/natural-disasters-losses-are-trending-upwards/floods-and-flash-floods-underestimated-natural-hazards.html>.
23. De Ruig, L.T., Haer, T., de Moel, H., Brody, S.D., Wouter Botzen, W.J., Czajkowski, J., and Aerts, J.C.J.H. (2022). Climate-proofing the National Flood Insurance Program. Policy brief, Climate adaptation; <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01502-6>.
24. Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O., and Jonkman, S.N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature communications*, 9:1985; <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04253-1>.
25. Flood issues and climate changes – Integrated Report for Tisza River Basin. (2018). Danube Transnational Programme JOINTISZA. Deliverable 5.1.2. project co-funded by the EU (ERDF, IPA funds), 136 p. Available from https://www.interreg-danube.eu/uploads/media/approved_project_output/0001/36/49d50d0b2429884b0a1f2eafc8c158b70bc31679.pdf.
26. Climate Landscape Analysis for Children (CLAC) in Ukraine. (2021). UNICEF, Hydroconseil, 156 p. Available from <https://www.unicef.org/ukraine/media/15766>.
27. Kikwasi, G.J. (2018). Critical Success Factors for Effective Risk Management. From the Edited Volume “Risk Management Treatise for Engineering Practitioners”. Edited by Ch.F. Oduoza. Chapter 4, 73-94; <https://doi.org/10.5772/intechopen.74419>.
28. Savage, L.J. (1954). *The foundations of statistics*. New York: Wiley, 294 p.; <https://doi.org/10.1002/nav>.
29. Stedinger, J.R., Vogel, R.M. and Foufoula-Georgia, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events. Chapter 18. In Maidment, D.R., Ed., *Handbook of Hydrology*, McGraw Hill, New York, 18.1-18.66.
30. Schröter, K., Falter, D., Nguyen, D., Kreibich, H., Vorogushyn, S., Hundedcha, Y., Apel, H., and Merz, B. (2014). Is probability of peak discharge a suitable proxy for probability of damage in flood risk analysis? International Conference “Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards”, Padua, Italy, Abstract code: D02.
31. Integrated flood risk management. Bulletin 156. (2014). CIGB, ICOLD. Commission Internationale des Grands Barrages, International commission on large dams. Paris, 288 p.
32. National Disaster Risk Assessment. Governance System, Methodologies, and Use of Results. (2017). Words into Action Guidelines. Consultative version. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), Geneva - Switzerland, 101 p.

33. Okoli, K., Breinl, K., Mazzoleni, M., and Di Baldassarre, G. (2019). Design Flood Estimation: Exploring the Potentials and Limitations of Two Alternative Approaches. *Water*, 11, 729; <https://doi.org/10.3390/w11040729>.
34. Statistical distributions for flood frequency analysis. (1989). World meteorological organization. Operational hydrology report No. 33, Geneva, Switzerland, 128 p.
35. Maity, R. (2018). *Statistical Methods in Hydrology and Hydroclimatology*. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, 451 p.; https://doi.org/10.1007/978-981-10-8779-0_1.
36. HEC-RAS River Analysis System. User's Manual V. 6.0. (2021). US Army Corps of Engineers. Inst. for Water Resources. Hydrologic Eng. Center. Available from https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_Users_Manual.pdf.
37. Stefanyshyn, D.V., Khodnevich, Y.V., Korbutiak, V.M. (2021). Estimating the Chezy roughness coefficient as a characteristic of hydraulic resistance to flow in river channels: a general overview, existing challenges, and ways of their overcoming. *Env. safety and natural resources*, 39(3), 16–43; URL: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.16-43>.
38. Blöschl, G., Bierkens, M.F.P., Chambel, A., Cudennec, Ch., Destouni, G., Fiori, A., Kirchner, J.W., McDonnell, J. J., Savenije, H. H.G., Sivapalan, M., Stumpp, Ch., Toth, E., Volpi, E., and al. (2019). Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64:10, 1141-1158; <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>.
39. Milly, P.C.D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P., and Stouffer, R.J. (2008). Stationarity is dead: whither water management? *Science*, 319, 573-574.
40. López, J., and Francés, F. (2013) Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 3189-3203; <https://doi.org/10.5194/hess-17-3189-2013>.
41. Debele, S.E., Strupczewski, W.G., and Bogdanowicz, E. (2017). A comparison of three approaches to non-stationary flood frequency analysis. *Acta Geophys.*, 65, 863-883; <https://doi.org/10.1007/s11600-017-0071-4>.
42. Villarini, G., Taylor, S., Wobus, C., Vogel, R., Hecht, J., White, K.D., Baker, B., Gilroy, K., Olsen, J.R., and Raff, D. (2018). Floods and Nonstationarity: A Review, CWTS 2018-01, U.S. Army Corps of Engineers: Washington, DC, 88 p.
43. Apel, H., Merz, B., Thielen, and A.H. (2008). Quantification of uncertainties in flood risk assessments. *International Journal of River Basin Management (JRBM)*, Vol. 6, No. 2, 149-162; <https://doi.org/10.1080/15715124.2008.9635344>.
44. Serinaldi, F., and Kilsby, Ch.G. (2015). Stationarity is undead: Uncertainty dominates the distribution. *Advances in Water Resources*, 77, 17–36; <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.12.013>.
45. Stefanyshyna-Gavryliuk, Yu.D., and Stefanyshyn, D.V. (2013). The use of fuzzy measure to overcome the uncertainty of long-term predictions based on extrapolations. *System Research and Information Technologies*, No. 4, 99–110; <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7021>. (in Ukrainian) [Стефанишина-Гаврилюк Ю.Д., Стефанишин Д.В. (2013). Використання нечіткої міри для подолання невизначеності довгострокових прогнозів на основі екстраполяцій. Системні дослідження та інформаційні технології, № 4, 99–110].
46. Apel, H., Thielen, A.H., Merz, B. and Blöschl, G. (2006). A Probabilistic Modelling System for Assessing Flood Risks. *Natural Hazards*, 38, 79-100; <https://doi.org/10.1007/s11069-005-8603-7>.
47. Stefanyshyn, D.V. (2018). On the use of the type I Gumbel distribution to assess risks given floods. *Mathematical modeling in economy [Математичне моделювання в економіці]*, №1, 74–83.

48. Korbutiak, V., Stefanyshyn, D., Lahodniuk, O., and Lahodniuk, A. (2020). The combined approach to solving issues of the flood hazard assessment using water gauge records and spatial data. *Acta Sci. Pol. Architectura* 19 (1), 111–118; <https://doi.org/10.22630/ASPA.2020.19.1.12>.
49. Stefanyshyn, D.V. (2021). Probability assessment of the Kyiv reservoir overflow. *Environmental safety and natural resources*, 40 (4), 73–99; <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.73-99>.
50. Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security (NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences). (2007). Paperback: Editors: O. F. Vasiliev, P. H. A. J. M. van Gelder, E. J. Plate, M. V. Bolgov. Springer; 1 edition, 480 p. Available from <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-4020-5741-0>.
51. Koutsoyiannis, D. (2008). Probability and statistics for geophysical processes. National Tech. University of Athens. Available from <https://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/1322/>.
52. Review of Applied-Statistical Methods for Flood-Frequency Analysis in Europe. (2012). Editors: Castellarin, A., Kohnová, S., Gaál, L., Fleig, A., Salinas, J.L., Toumazis, A., Kjeldsen, T.R., and Macdonald, N. NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 122 p. Available from <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/19286/>.
53. Ren, M., He, X., Kan, G., Wang, F., Zhang, H., Li, H., Cao, D., Wang, H., Sun, D., Jiang, X., Wang, G., and Zhang, Z. (2017). A Comparison of Flood Control Standards for Reservoir Engineering for Different Countries. *Water*, 9, 152; <https://doi.org/10.3390/w9030152>.
54. Stefanyshyn, D.V. (2008). Application of risk analysis to support safety of dams and flooded territories against floods. Proc. of Int. Scientific School “Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems”. June 24–28, Saint-Petersburg, Russia, 371–376.
55. Cunnane, C. (1978). Unbiased plotting positions – A review. *Journal of Hydrology*, Vol. 37, Issues 3-4, 205-222; [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90017-3).
56. Ahmad Shukri Yahaya, Norlida Md. Nor, Nor Rohashikin Mat Jali, Nor Azam Ramli, Fauziah Ahmad, and Ahmad Zia Ul-Saufie (2012). Determination of the Probability Plotting Position for Type I Extreme Value Distribution. *Journal of Applied Sciences*, 12, 1501–1506; <https://doi.org/10.3923/jas.2012.1501.1506>.
57. Harter, H.L. (1984). Another look at plotting positions. *Communications in Statistics – Theory and Methods*, Vol. 13, Issue 13, 1613-1633; <https://doi.org/10.1080/03610928408828781>.
58. Shabri, A. (2002). A comparison of plotting formulas for the Pearson type III distribution. *Jurnal Teknologi*, 36(C), 61–74.
59. Makkonen, L. (2006). Plotting Positions in Extreme Value Analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 45, 334–340; <https://doi.org/10.1175/JAM2349.1>.
60. Mehdi, F., and Mehdi, J. (2011). Determination of Plotting Position Formula for the Normal, Log-Normal, Pearson (III), Log-Pearson (III) and Gumble Distributional Hypotheses Using The Probability Plot Correlation Coefficient Test. *World Applied Sciences Journal*, 15 (8), 1181–1185.
61. Ologhadien, I. (2021). Study of Unbiased Plotting Position Formulae for the Generalized Extreme Value (GEV) Distribution. *European J. of Eng. and Technology Research*, Vol. 6, Issue 4, 94–99; <http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2021.6.4.2468>.
62. Ologhadien, I. (2021). Evaluation of Plotting Position Formulae for Pearson Type 3 Distribution in Three Hydrological Stations on the Niger River. *Int. Journal of Environment and Climate Change*, 11(9), 117–128; <https://doi.org/10.9734/IJECC/2021/v11i930485>.
63. Miklanek, P., and Pavla Pekarová, P. (2009). 100-year Flood Event Scenario and Flood Risk Assessment for Uzh River at Lekarovce (Slovakia). *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*. Ohrid/Macedonia, Paper A108, 749–760.
64. Kovalets, I.V., Kivva, S.L., and Udovenko, O.I. (2015). Usage of the WRF/DHSVM model chain for simulation of extreme floods in mountainous areas: a pilot study for the Uzh River Basin in the Ukrainian Carpathians. *Natural Hazards*, 75, 2049–2063; <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1412-0>.

65. Ecosystem services and hydropower: pilot application of European tools in the river basin of the EaP countries. (2021). Policy paper / compiled by: R. Havryliuk, O. Cazanteva, I. Trombitsky [et al.]. Chişinău: Eco-TIRAS, 68 p.
66. Velychko, S., and Dupliak, O. (2021). Hydrological Assessment of the Water Replenishment Possibility of the Uzh River Urbanized Floodplain on the Example of Bozdosky Park, Ukraine. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 22 (4), 30–38; <https://doi.org/10.12912/27197050/137871>.
67. Obodovskyi, O.G., Surai, K.S., Pochayevets, O.O. (2018). Estimation of the minimum water flow of the rivers of the Uzh sub-basin (the Tisza river basin). *Hidrolohiia, hidrokhiimiia i hidroekolohiia*, 2 (49), 6–15. (In Ukrainian) [Ободовський О.Г., Сурай К.С., Почаєвць О.О. (2018). Оцінка мінімального стоку води річок суббасейну Ужа (басейн річки Тиса). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2 (49), 6–15].
68. Stoyko, S.M. (2002). The causes of catastrophic floods in the Transcarpathian region and the system of ecological prophylactic measures for their prevention. TISCIA monograph series, 6, 17–28.
69. Babych, M. (2009). Flood management in Transcarpathia Region of Ukraine. State Committee of Ukraine for Water management. Available from <https://unece.org/fileadmin/DAM/env/water/meetings/flood/workshop%202009/presentations/session%202/Babich.pdf>.
70. Bálint, M.Z. (2017). Multilateral efforts towards basin wide flood control along the Tisza River: The Hungarian-Ukrainian joint Upper-Tisza flood development program. *Hungarian Journal of Hydrology*, Vol. 97, No. 3, 73-80.
71. Central Geophysical Observatory named after Boris Sreznevsky. Available from <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/index.php?lang=en&dv=main>.
72. Brezinski, C., and Redivo-Zaglia, M. (2020). Extrapolation and Rational Approximation. The Works of the Main Contributors. Springer Nature, Cham, Switzerland, 406 p.; doi:10.1007/978-3-030-58418-4.
73. Fishburn, P.C. (1970). *Utility Theory for Decision Making*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 234 p.
74. Fishburn, P.C. (1989). Non-transitive measurable utility for decision under uncertainty. *Journal of Mathematical Economics*, Vol. 18, Issue 2, 187-207; [https://doi.org/10.1016/0304-4068\(89\)90021-9](https://doi.org/10.1016/0304-4068(89)90021-9).
75. De Rocquigny, E. (2012). *Modelling Under Risk and Uncertainty: An Introduction to Statistical, Phenomenological and Computational Methods*. Wiley series in probability and statistics, 484 p.
76. Kochenderfer, M.J. (2015). *Decision-making under uncertainty. Theory and Application*. With Ch. Amato, G. Chowdhary, J.P. How, H.J. Davison Reynolds, J.R.Thornton, P.A. Torres-Carrasquillo, N. Kemal Üre, and J. Vian. Massachusetts Institute of Technology, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 323 p.

The article was received 07.02.2023 and was accepted after revision 24.05.2023

Д.В. Стефанишин

АПРОБАЦІЯ ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ МАКСИМАЛЬНИХ ВИТРАТ ПАВОДКІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ФОРМУЛ ЕМПІРИЧНОЇ ЙМОВІРНОСТІ: ПРИКЛАД РІЧКИ УЖ, ДАНІ ГІДРОЛОГІЧНОЇ СТАНЦІЇ «УЖГОРОД»

Анотація. Існує багато аналітичних розподілів ймовірності, які можна використовувати для прогнозування пікових витрат повеней. Однак, належного теоретичного чи іншого подібного обґрунтування для вибору відповідного параметричного розподілу ймовірності для прогнозування пікових витрат повеней на основі даних спостережень не існує. Будь-який із рекомендованих розподілів ймовірності можна вважати допустимою гіпотезою, якщо він відповідає заданим статистичним критеріям і при цьому враховуються інші міркування щодо адекватності

моделювання. У свою чергу, для порівняння теоретичних параметричних розподілів ймовірності із спостережуваними даними було запропоновано понад сімнадцять різних формул для розрахунку емпіричних ймовірностей подій, що відбулися. І, з точки зору прийняття рішень, усі ці формули також слід розглядати як допустимі варіанти при підгонці теоретичних розподілів ймовірності та виборі серед них кращого в якості моделі.

Незважаючи на те, що вибір кращої формули емпіричної ймовірності для підгонки й порівняння різних розподілів ймовірностей багато разів обговорювався в гідрологічній та статистичній літературі, досі не запропоновано жодного конкретного критерію для вибору серед цих формул. Можливо, такий критерій взагалі і не потрібен. Можливо, більше значення має різноманітність оцінок, які можна отримати за допомогою цих формул. Як відомо, формули емпіричної ймовірності забезпечують достатньо прості непараметричні засоби для оцінки розподілу ймовірностей спостережуваних даних, тому з точки зору інформаційної ентропії ці різні оцінки дозволяють виявити епістемічну (нестохастичну або суб'єктивну) невизначеність у прогнозах гідрологічних екстремумів.

Результати розрахунку емпіричних річних ймовірностей перевищення спостережуваних максимальних витрат води паводків із застосуванням різних формул емпіричної ймовірності показують, що збільшення горизонту прогнозування в бік малоймовірних, більш екстремальних подій збільшує розбіжність між оцінками, отриманими за допомогою різних формул, що при цьому використовуються. Таким чином, розумно припустити, що ця розбіжність може бути екстрапольована для прогнозу розрахункової максимальної витрати на основі отриманих емпіричних оцінок ймовірності витрат, що спостерігалися.

У цій статті пропонується оригінальний чисельно-аналітичний метод із використанням такої екстраполяції. Він заснований на використанні різних формул емпіричної ймовірності, чисельних розрахунках емпіричних ймовірностей та екстраполяції розбіжності між отриманими оцінками. Метод апробовано при прогнозуванні максимальних витрат 0,5% та 1% річної ймовірності перевищення для річки Уж, що протікає в Закарпатській області, за даними спостережень на гідрологічній станції «Ужгород».

Ключові слова: річна ймовірність перевищення; показник розбіжності; екстраполяція; паводки; чисельно-аналітичний метод; формули емпіричної ймовірності; розподіли ймовірності; прогноз; період повторення.

Стаття надійшла до редакції 07.02.2023 і прийнята до друку після рецензування 24.05.2023

Стефанишин Дмитро Володимирович

доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-1613> **e-mail:** d.v.stefanyshyn@gmail.com

УДК 519.63, 532.5

Maksym Sorokin, Researcher

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

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

PARALLELIZATION OF NUMERICAL SOLUTIONS OF SHALLOW WATER EQUATIONS BY THE FINITE VOLUME METHOD FOR IMPLEMENTATION ON MULTIPROCESSOR SYSTEMS AND GRAPHICS PROCESSORS

***Abstract.** An overview of approaches to parallelization of grid-based numerical methods for solving shallow water equations for multiprocessor systems and graphics processors is presented. A multithreaded approach for shared-memory computing systems implemented on the basis of the OpenMP programming interface and a geometric decomposition approach with message-passing using the MPI library for distributed-memory computers are described. Multithreading for programming GPUs based on the OpenACC software interface is considered. For the COASTOX-UN system of two-dimensional modeling of hydrodynamics, sediment and radionuclide transport in river systems and coastal areas of the seas, the parallelization of its hydrodynamic model COASTOX-HD was carried out. In the developed numerical model, the shallow water equations are solved by finite-volume numerical methods on unstructured computational grids with triangular cells of variable size. The parallelization is implemented using a hybrid MPI+OpenACC approach targeting multiprocessor systems and GPUs. For multiprocessor computers, geometric decomposition and MPI-based messaging are used, and for GPUs, multithreading is implemented using OpenACC directives. The performance of the developed parallel hydrodynamic model was evaluated during the calculation of typical problems of hydrodynamics of shallow water bodies, river flood, and tsunami wave run-up on the coast on a Dell Precision Workstation 7920 multi-core workstation with two 20-core Intel Xeon Gold 6230 processors and NVIDIA Quadro RTX 5000 and NVIDIA GeForce RTX 3080 graphics cards. It is shown that the developed model has significantly accelerated the simulation on the considered multiprocessor system and the considered GPUs. The acceleration on GPUs depends on the size of the computational grid, increasing to saturation with an increase in the number of grid cells. It is established that for the developed parallel model, whose numerical schemes are related to algorithms with low computational intensity, the memory bandwidth of the NVIDIA architecture GPUs is a more important limiting factor of acceleration than their performance.*

***Keywords:** river modeling; coastal modeling; shallow water equations; finite volume; unstructured grid; parallel computing; GPU computing; MPI; OpenACC.*

© М.В. Сорокін, 2023

М.В. Сорокін

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

РОЗПАРАЛЕЛЮВАННЯ ЧИСЕЛЬНИХ РОЗВ'ЯЗКІВ РІВНЯНЬ МІЛКОЇ ВОДИ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ОБ'ЄМІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ НА БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ І ГРАФІЧНИХ ПРОЦЕСОРАХ

***Анотація.** Представлено огляд підходів до розпаралелювання сіткових чисельних методів розв'язування рівнянь мілкої води для багатопроцесорних систем та графічних процесорів. Описано багатопотоковий підхід для обчислювальних систем із загальною пам'яттю, реалізований на основі програмного інтерфейсу OpenMP, та підхід геометричної декомпозиції з передачею повідомлень з використанням бібліотеки MPI для комп'ютерів з розподіленою пам'яттю. Розглянуто багатопотоковість для програмування графічних процесорів на основі програмного інтерфейсу OpenACC. Для системи COASTOX-UN двовимірного моделювання гідродинаміки, переносу наносів і радіонуклідів у річкових системах і прибережних районах морів проведено розпаралелювання її гідродинамічної моделі COASTOX-HD. В розробленій чисельній моделі рівняння мілкої води розв'язуються скінченно-об'ємними чисельними методами на неструктурованих обчислювальних сітках з трикутними комірками змінного розміру. Розпаралелення реалізовано за допомогою гібридного підходу MPI+OpenACC, орієнтованого на багатопроцесорні системи і графічні процесори. Для багатопроцесорних комп'ютерів використовується геометрична декомпозиція і обмін повідомленнями на основі MPI, для графічних процесорів – багатопотоковість, реалізована за допомогою директив OpenACC. Представлено тестування продуктивності розробленої паралельної гідродинамічної моделі при обчисленні характерних задач гідродинаміки мілководних водойм, річкової повені і набігання хвилі цунамі на узбережжя, на багатоядерній робочій станції Dell Precision Workstation 7920 з двома 20-ядерними процесорами Intel Xeon Gold 6230 і графічних картах NVIDIA Quadro RTX 5000 і NVIDIA GeForce RTX 3080. Показано, що розроблена модель значно прискорює моделювання задач на розглянутих багатопроцесорній системі і графічних процесорах. Прискорення обчислення задач на графічних процесорах залежить від розміру розрахункової сітки, зростаючи до насичення при збільшенні кількості комірок сітки. Встановлено, що для розробленої паралельної моделі, чисельні схеми якої відносяться до алгоритмів з невисокою обчислювальною інтенсивністю, пропускна здатність пам'яті графічних процесорів архітектури NVIDIA є більш важливим обмежуючим фактором прискорення, чим їхня продуктивність.*

Ключові слова: моделювання річкових систем; моделювання прибережних зон моря; рівняння мілкої води; скінченні об'єми; неструктуровані сітки; паралельні обчислення; обчислення на GPU, MPI, OpenACC.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.163-193>

1. Вступ

Чисельні моделі, засновані на двовимірних рівняннях мілкої води (РМВ), використовуються для моделювання широкого спектра задач гідродинаміки і переносу забруднень у річках, водосховищах, озерах і прибережних зонах морів, коли характерний горизонтальний розмір збурення набагато більше глибини водойми.

Після аварії на Чорнобильській АЕС, для обґрунтування водоохоронних заходів у Чорнобильській зоні відчуження з урахуванням переносу радіонуклідів (^{90}Sr та ^{137}Cs) у заплаві р. Прип'ять та водосховищах р. Дніпро в Інституті проблем математичних машин і систем НАН України (ПММС) почалась розробка системи моделей різної розмірності, що включала початкову версію двовимірної моделі COASTOX, заснованої на РМВ [1–3].

На теперішній час COASTOX-UN – це система моделювання гідродинаміки (COASTOX-HD), транспорту наносів (COASTOX-SED) і радіонуклідів (COASTOX-RN) у річкових системах і прибережних районах морів з урахуванням впливу річкового стоку, атмосферного тиску, вітру і вітрових хвиль. Рівняння моделі включають РМВ, двовимірні рівняння переносу наносів та радіонуклідів і рівняння обміну між водною товщею і верхнім шаром дна, що розв'язуються за допомогою чисельних методів скінченних об'ємів на неструктурованих розрахункових сітках з трикутними комірками змінного розміру [4].

COASTOX-HD є аналогом відомих і широко використовуваних систем моделювання, таких як програмний комплекс MIKE 21 розробки датської компанії DHI [5], системи моделювання TELEMAC від консорціуму TELEMAC-MASCARET [6], системи CMS, розробленої Корпусом інженерів Армії США [7]. COASTOX-HD використовувалася у великій кількості проєктів у США, Індонезії, Сінгапурі, Японії та Україні [8–13]. COASTOX-HD, разом COASTOX-SED і COASTOX-RN включено в модуль двовимірного моделювання дисперсії радіонуклідів у водному середовищі для системи підтримки прийняття рішень (СППР) – багатофункціональної системи ядерного аварійного реагування JRODOS [14]. На основі COASTOX-HD розроблено декілька СППР у випадку катастрофічних паводків: системи прогнозування затоплення берегів р. Дніпро у м. Київ [15], системи моделювання повеней на р. Дністер у м. Могилів-Подільський [16], системи передбачення паводків в Українській частині басейнів річок Прут та Сірет [17].

Використання подібних систем моделей для розв'язку комплексних гідродинамічних задач у водоймах великого розміру, з високою деталізацією, на тривалих часових періодах потребує значних обчислювальних ресурсів.

Основним напрямком прискорення розрахунків є використання паралельних методів розв'язку основних рівнянь моделей, орієнтованих на паралельні обчислювальні системи (ПОС): багатопроцесорні комп'ютерні системи із загальною або розподіленою пам'яттю, кластери, графічні процесори (GPU).

Тому разом із розробкою системи моделей COASTOX в ПММС розвивалися методи паралелізації її алгоритмів. Спочатку була розроблена версія COASTOX-UN для багатопроцесорних систем: багатоядерних робочих станцій та кластерів, на основі геометричної декомпозиції розрахункової сітки з використанням технології MPI [18]. Пізніше – версія COASTOX-UN для GPU на основі програмного інтерфейсу OpenACC [19].

У цій статті викладається метод розпаралелювання чисельних схем розв'язку РМВ гідродинамічної моделі COASTOX-HD, з системи моделей COASTOX-UN, за допомогою гібридного підходу MPI+OpenACC. Представлені результати тестування її продуктивності та ефективності при розв'язанні різних задач гідродинаміки мілководних водойм на багатопроцесорних системах і графічних процесорах, використання яких

дозволило на два порядки збільшити швидкість обчислювань, що дає можливість використовувати розрахункові сітки з дуже великою кількістю вузлів на доступних широкому колу користувачів ПОС. Наведені приклади чисельного розв'язання задач, що вимагали великих розрахункових сіток, та проаналізовано вплив технічних характеристик ПОС на продуктивність паралельних обчислень.

2. Огляд підходів до розпаралелювання різницевих методів розв'язку рівнянь мілкої води

Для чисельного розв'язку РМВ найбільш поширені методи скінченних різниць, скінченних об'ємів або скінченних елементів, реалізовані на розрахункових сітках різної структури. Розрахункові сітки можуть бути як простими прямокутними (MIKE 21), так і більш складними: телескопічними декартовими, з прямокутними комітками, що локально згущуються (CMS), або неструктурованими з трикутними елементами змінного розміру (TELEMAC, MIKE-21).

Основним напрямком прискорення розв'язку РМВ на сучасних обчислювальних системах є використання паралельних методів.

Різницеві методи розв'язку рівнянь динаміки мілководних водойм є перспективними для розпаралелювання через наявність у них внутрішнього паралелізму, при якому у початковому алгоритмі легко виділити незалежні один від одного обчислення.

Відповідно до цих методів, неперервні змінні дискретно апроксимуються у просторі (на розрахунковій сітці) та часі. Диференціальні рівняння при цьому представляються алгебраїчними різницевами, для розв'язку яких необхідна обробка дискретизованих змінних і коефіцієнтів рівняння ітераційно за часовими кроками. При цьому на кожному кроці для окремих елементів розрахункової сітки виконуються одні й ті самі операції. Якщо при цьому обчислення ще й локальні, тобто для розрахунку змінної в якомусь елементі необхідні дані тільки з сусідніх елементів, то розпаралелювання природним чином будується на розподілі розрахунку окремих елементів сітки за окремими процесорними пристроями паралельної комп'ютерної системи.

Конкретне формулювання алгоритму та вибір програмного інструменту для його реалізації залежить від архітектури обчислювальної системи. Можна виділити два основних класи ПОС, що відрізняються організацією пам'яті, та відповідні їм технології паралельного програмування різницевих методів.

Перший – це обчислювальні системи із загальною пам'яттю, у яких процесорні пристрої розділяють єдиний простір адресів пам'яті. Для їх програмування використовується парадигма потоків. Спрощено це можна представити так – майстер потік створює деяку кількість додаткових потоків, що відповідає числу задіяних процесорів ПОС, потоки обробляють окремі ітерації в циклі за елементами сітки і переходять до наступних ітерацій, доки не буде виконано розрахунок всіх елементів. Перед наступним циклом за елементами виконується синхронізація потоків.

Другий – системи з розподіленою пам'яттю, у яких кожен процесор разом із локальною пам'яттю утворює вузол ПОС, а окремі вузли об'єднані комунікаційним середовищем. Для програмування таких систем застосовується парадигма паралельних процесів, що обмінюються повідомленнями. У цьому випадку паралельні процеси ініціалізуються

відповідно до числа використовуваних процесорів, розрахункова сітка розбивається на підобласті (геометрична декомпозиція), процесу/процесору ставиться у відповідність підобласть для розрахунку елементів в ній, відсутні дані уздовж границі підобластей процеси отримують в результаті обміну повідомленнями.

Найбільш популярні технології паралельного програмування різницевих методів для ПОС із загальною та розподіленою пам'яттю – це, відповідно, програмний інтерфейс OpenMP та інтерфейс передачі повідомлень MPI.

Технологія OpenMP надає набір директив для виділення ділянок алгоритму, наприклад циклів за елементами, для яких компілятор повинен згенерувати паралельний багатопотоковий код. Вона орієнтована на SMP-системи (Symmetric Multiprocessors), клас комп'ютерів, у яких однорідні процесори мають однаковий доступ до загальної пам'яті. Наприклад, загальнодоступними SMP-системами є персональні комп'ютери, робочі станції, сервери з багатоядерними процесорами Intel та AMD, що можуть містити до кількох десятків ядер – симетричних процесорів. Наразі підходи до розпаралелювання різницевих методів з використанням OpenMP добре розвинені та розроблено вже досить багато OpenMP реалізацій моделей гідродинаміки мілкої води [20–24]. Згадані вище системи моделей CMS та MIKE 21 також розпаралелені за допомогою OpenMP.

Технологія MPI реалізована у вигляді бібліотеки функцій, для традиційних мов програмування. Отже, MPI функції служать для ініціалізації паралельних процесів, передачі повідомлень між ними, їх колективної взаємодії, а алгоритм для кожного процесу написаний традиційною мовою. При цьому для різницевих методів зазвичай використовується SPMD підхід (Single Program, Multiple Data), так що для основної частини обчислень, циклів за елементами своїх підобластей, процеси виконують однаковий алгоритм. Хоча технологія призначена в першу чергу для ПОС з розподіленою пам'яттю, MPI також підтримує деякі типи SMP-систем, наприклад сервери з багатоядерними процесорами. У цьому випадку взаємодія між процесами виконується не через комунікаційне середовище, а через загальну пам'ять. MPI також підтримує такий клас високопродуктивних ПОС, як кластери, у яких сервери з багатоядерними процесорами об'єднані високошвидкісною мережею. Завдяки цьому технологія MPI популярніша для розпаралелювання різницевих методів, ніж OpenMP, а MPI моделі динаміки мілководних водойм набули більш широкого розповсюдження. Це, наприклад, моделі гідродинаміки прибережної зони моря ADCIRC-2DDI [25] та SLOSH [26], прогнозу повеней та гідродинаміки річкових систем RMA2 [27] та TRENT [28]. Зазначимо, що вищеназвана система моделей TELEMAC розпаралелена за допомогою MPI, а система Mike 21 має, крім OpenMP, також MPI версії своїх обчислювальних модулів.

Відносно того, яка технологія розпаралелювання дозволяє швидше моделювати задачі на серверах з багатоядерними процесорами, у літературі є повідомлення про більшу ефективність як OpenMP [22], так і MPI [29] версій алгоритмів моделей. Це обумовлено тим, наскільки кожна технологія та відповідний паралельний алгоритм підходить до конкретного процесора. Тому, для більш гнучкої адаптації моделей динаміки мілкої води до ПОС, насамперед кластерного типу, перспективним є гібридний підхід до паралелізації – MPI+OpenMP, із багатопотоковістю всередині вузла кластера

та MPI комунікацією між вузлами. Так розпаралелена, наприклад, модель гідродинаміки мілкої води TELEMACH-2D [30].

Починаючи з 2000-х років для прискорення розрахунків, у тому числі різницевих методів, почав використовуватися ще один тип обчислювачів. Це графічні процесори (GPU – graphics processing unit): відеокарти та прискорювачі на основі GPU. Сучасні GPU містять тисячі ядер – скалярних процесорів і мають сумарну обчислювальну потужність більшу, ніж багатоядерні процесори. Групи ядер із кешем та загальною пам'яттю утворюють потокові мультипроцесори, що розділяють загальну глобальну пам'ять GPU. Її пропускна здатність вища, ніж шини обміну даними між центральним процесором та загальною пам'яттю. Це додатковий ресурс для прискорення різницевих методів, що відносяться до алгоритмів з невисокою обчислювальною інтенсивністю, для яких число арифметичних операцій на байт переданих даних менше одиниці [31].

GPU можна, в деякому сенсі, вважати ПОС із загальною пам'яттю. Для їх програмування також використовується багатопотоковий підхід. Один із інструментів його реалізації – розширення стандартних мов CUDA C/C++ та CUDA Fortran. Вони є засобами низькорівневого програмування, що дозволяють маніпулювати поточковими мультипроцесорами та різними рівнями пам'яті GPU і досягати високої продуктивності GPU програм. Недоліки CUDA Fortran і C – це те, що вони потребують значних зусиль та часу на розробку, а отримана паралельна програма може бути використана лише на GPU від компанії NVIDIA. Тим не менш, на сьогоднішній день це найуживаніша технологія розпаралелювання алгоритмів для GPU. За її допомогою створені GPU версії моделей гідродинаміки мілкої води SCHE2D [32], TUFLOW [33], Iber [34], TRITON [35].

Останнім часом популярним засобом, що спрощує розробку для GPU, стала модель паралельного програмування OpenACC. Подібно до OpenMP, OpenACC є набором директив компілятора для мов C і Fortran. За допомогою них можна вказати ділянки алгоритму, наприклад, цикли, з незалежними ітераціями, які можуть бути оброблені багатоядерними процесорами в багатопотоковому режимі. OpenACC має низку переваг. Крім GPU від NVIDIA, OpenACC підтримує архітектури багатоядерних процесорів Intel, AMD, POWER та Arm. Дозволяє реалізувати паралелізм, що міститься в алгоритмі, без його істотного перероблення. Допускає поетапне розпаралелювання. Написаний на основі OpenACC програмний код значно коротший за код мовами CUDA. При цьому OpenACC забезпечує, хоча і меншу, ніж CUDA, але все ж таки порівнянну продуктивність різницевих методів на GPU (від 50% до 98% згідно з [36]). Тому все більше моделей динаміки мілководних водойм розпаралелюється за допомогою OpenACC [22, 37, 38].

Для адаптації моделей під декілька графічних процесорів, сервери з кількома GPU або кластери, вузли яких містять GPU, використовується аналогічний MPI+OpenMP гібридний підхід – MPI+CUDA [33, 35] або MPI+OpenACC [39, 40].

Саме останній використано для розпаралелювання чисельних схем розв'язку РМВ гідродинамічної моделі COASTOX-HD.

3. Основні рівняння моделі

Гідродинамічні рівняння моделі COASTOX-HD – це РМВ, що утворюються інтегруванням тривимірних рівнянь по глибині шару води з використанням кінематичних граничних умов, які описують адвекцію водних мас за заданим рельєфом під дією гравітації з урахуванням гідростатичного тиску, припливних сил, сили Коріоліса, атмосферного тиску, дії вітру, хвильових напружень, донного тертя і турбулентної в'язкості:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \mathbf{F} = \mathbf{S} + \nabla \mathbf{F}^d, \quad (1)$$

де \mathbf{U} – вектор змінних, $\mathbf{F} = (\mathbf{E}, \mathbf{G})$ – вектор конвективного потоку, $\mathbf{F}^d = (\mathbf{E}^d, \mathbf{G}^d)$ – вектор дифузійного потоку (\mathbf{E} і \mathbf{G} – компоненти в x та y напрямках), \mathbf{S} – вектор вільних членів, що визначаються за формулами:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + \frac{1}{2}gh^2 \\ uq_y \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}, \mathbf{E}^d = \begin{bmatrix} 0 \\ D_x \frac{\partial q_x}{\partial x} \\ D_x \frac{\partial q_y}{\partial x} \end{bmatrix}, \mathbf{G}^d = \begin{bmatrix} 0 \\ D_y \frac{\partial q_x}{\partial y} \\ D_y \frac{\partial q_y}{\partial y} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + gh \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_x^\xi + \tau_x^S - \tau_x^\eta) + fq_y - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x} \\ -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + gh \frac{\partial \psi}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_y^\xi + \tau_y^S - \tau_y^\eta) - fq_x - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Тут $\eta(x, y, t)$ – рівень поверхні землі; $\xi(x, y, t)$ – рівень вільної поверхні води; h – глибина води ($= \xi - \eta$); u, v – x та y компоненти осередненої по глибині швидкості потоку; q_x, q_y – компоненти витрати води через одиничну ширину; g – прискорення вільного падіння; ρ – густина води; $\partial \eta / \partial x, \partial \eta / \partial y$ – похили річкового дна в x та y напрямках; ψ – припливоутворюючий потенціал; τ_x^η, τ_y^η – дотичні напруження на дні в x та y напрямках; τ_x^ξ, τ_y^ξ – вітрові дотичні напруження на поверхні води; τ_x^S, τ_y^S – хвильові дотичні напруження; f – параметр Коріоліса; P_a – атмосферний тиск на вільній поверхні; D_x, D_y – компоненти коефіцієнта турбулентної в'язкості.

Донне тертя апроксимоване квадратичною залежністю від швидкості течії:

$$\tau_x^\eta / \rho = c_b u U, \tau_y^\eta / \rho = c_b v U, U = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (3)$$

з коефіцієнтом тертя c_b , що задається формулами Маніга $c_b = g n^2 / h^3$ (n – коефіцієнт шорсткості Манінга) або Шезі $c_b = g / c^2$ (c – коефіцієнт шорсткості Шезі).

Вітрові дотичні напруження визначаються наступним чином:

$$\tau_x^\xi = C_d \rho_a W^2 \sin \theta, \tau_y^\xi = C_d \rho_a W^2 \cos \theta, \quad (4)$$

де C_d – коефіцієнт тертя вітру об вільну поверхню води, ρ_a – густина повітря, W – швидкість вітру, θ – напрямок вітру в декартовій системі координат.

Хвильові дотичні напруження розраховуються за формулами:

$$\frac{\tau_x^\xi}{\rho} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right), \quad \frac{\tau_y^\xi}{\rho} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right), \quad (5)$$

через компоненти хвильових радіаційних напружень, S_{xx} , S_{xy} , S_{yy} , що обчислюються об'єднаною із COASTOX-HD хвильовою моделлю.

Параметр Коріоліса дається виразом:

$$f = 2\Omega \sin \varphi, \quad (6)$$

Ω – кутова частота обертання Землі, φ – широта.

Припливоутворюючий потенціал визначено, як у моделі ADCIRC [25]:

$$\psi(\lambda, \varphi, t) = \sum_{j,n} \varepsilon_{j,n} A_{j,n} f_{j,n}(t_0) L_j(\varphi) \cos[2\pi(t - t_0)/T_{j,n} + j\lambda + v_{j,n}(t_0)], \quad (7)$$

де $\varepsilon_{j,n}$ – коефіцієнт зменшення амплітуди припливу завдяки пружній реакції Землі на припливи; $A_{j,n}$ – амплітуда припливної компоненти n , припливу виду j ; $f_{j,n}(t_0)$ – вузловий коефіцієнт, що враховує вплив 18.6-річного припливу на короткостроковий приплив; $j = 0, 1, 2$ – вид припливу: $j = 0$ – довгостроковий, $j = 1$ – добовий, $j = 2$ – напівдобовий; $L_0(\varphi) = 3 \sin^2(\varphi) - 1$, $L_1(\varphi) = \sin(2\varphi)$, $L_2(\varphi) = \cos^2(\varphi)$; λ – довгота; $T_{j,n}$ – період припливу; $v_{j,n}(t_0)$ – астрономічний аргумент; t_0 – час відліку. Необхідний набір припливних компонент залежить від розташування досліджуваної водойми та потрібної точності прогнозу.

4. Чисельні алгоритми моделі

Чисельні схеми рівнянь гідродинамічної моделі COASTOX-HD, отримані на основі методу контрольних об'ємів, відповідно до якого, область моделювання дискретизується на неструктуровану розрахункову сітку із трикутними комірками – контрольними об'ємами (Рис. 1а). Кожен контрольний об'єм оточує точку, розташовану у центрі трикутника, в який визначаються всі гідродинамічні змінні рівнянь, рівень дна задано у вузлах сітки – вершинах трикутників, потоки через границі між комірками задано у серединах ребер трикутників (Рис. 1б). Вісь z вважається направленою протилежно вектору сили тяжіння.

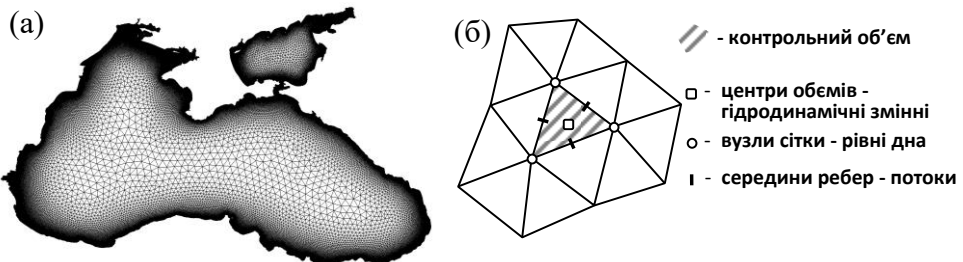


Рис. 1. а) Приклад неструктурованої сітки моделі COASTOX-HD для Чорного і Азовського морів. б) Збільшене зображення контрольного об'єму із зазначенням прив'язки змінних

Дискретизація рівнянь моделі здійснюється шляхом інтегрування їх по контрольних об'ємах. Інтегруючи РМВ (1, 2) по контрольному об'єму A із границею L , отримуємо рівняння:

$$\int_A \left(\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} - \nabla \cdot \mathbf{F}^d - \mathbf{S} \right) dA = 0. \quad (8)$$

Використовуючи теорему Остроградського, інтеграл по контрольному об'єму від дивергенції конвекційного потоку перетворюємо на інтеграл по його границі:

$$\int_A \left(\frac{\partial U}{\partial t} - \mathbf{S} \right) dA + \oint_L (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n} - \mathbf{F}^d \cdot \mathbf{n}) dl = 0. \quad (9)$$

В результаті дискретизації рівняння (9) інтеграли по контрольному об'єму апроксимуються середніми значеннями векторів в об'ємі, а інтеграл по границі апроксимується сумою по його ребрах:

$$\Delta A \frac{\Delta U}{\Delta t} = - \sum_{k=1}^3 \mathbf{F}_k \cdot \mathbf{n}_k \Delta l_k + \sum_{k=1}^3 \mathbf{F}_k^d \cdot \mathbf{n}_k \Delta l_k + \Delta A \mathbf{S}, \quad (10)$$

де Δt – часовий крок, ΔA – площа контрольного об'єму, \mathbf{n}_k – одинична нормаль до ребра k ($\mathbf{n} = (n_x, n_y)$), Δl_k – довжина ребра k .

Алгоритм розв'язання рівнянь (10) оснований на схемі SEA [41] та ряді модифікацій, описаних у [42]. Розв'язок відбувається за явним двоетапним методом Рунге-Кутта типу предиктор-коректор із використанням двох різних методів обрахунку потоків на етапах предиктора та коректора, завдяки чому досягається 2-й порядок у часі і просторі.

Для розрахунку потоків використовується підхід, заснований на властивості обертальної інваріантності двовимірних РМВ. Згідно з нею

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{T}_n^{-1} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{T}_n \cdot \mathbf{U}), \quad (11)$$

де \mathbf{T}_n – матриця повороту векторів до локальної системи координат із віссю x уздовж вектора нормалі \mathbf{n} до границі між комірками (Рис. 2), \mathbf{T}_n^{-1} – матриця повороту до початкової системи координат:

$$\mathbf{T}_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & n_x & n_y \\ 0 & -n_y & n_x \end{pmatrix}, \quad \mathbf{T}_n^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & n_x & -n_y \\ 0 & n_y & n_x \end{pmatrix}. \quad (12)$$

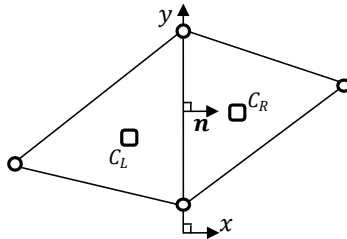


Рис. 2. Локальна система координат, заснована на границі між комірками

Таким чином, конвективний потік може бути обчислено в локальній системі координат, із використанням тільки компоненти \mathbf{E} , а потім відтворено в початковій системі координат за допомогою перетворення (12).

Для розрахунку компоненти \mathbf{E}^p на етапі предиктора використовується схема обчислення потоку Годуновського типу із наближеними методами розв'язання задачі Рімана: HLLC [43] чи Роу [44].

На етапі коректора потоки рахуються безпосередньо, вниз за потоком, використовуючи стани задачі Рімана:

$$\mathbf{E}^c(\mathbf{T}_n \cdot \tilde{\mathbf{U}}) = \begin{cases} \mathbf{E}(\tilde{\mathbf{U}}_R), & \text{if } \frac{1}{2}(\tilde{u}_L + \tilde{u}_R) \geq 0 \\ \mathbf{E}(\tilde{\mathbf{U}}_L), & \text{if } \frac{1}{2}(\tilde{u}_L + \tilde{u}_R) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

де $\tilde{\mathbf{U}}_L, \tilde{\mathbf{U}}_R$ – вектори змінних на лівій і правій сторонах границі, прогнозовані на етапі предиктора, перетворені до локальної системи координат; \tilde{u}_L, \tilde{u}_R – прогнозовані швидкості потоку нормальні до границі (позитивний напрямок від лівої комірки до правої).

Для моделювання течій із різкою зміною параметрів, загальний конвективний потік через ребро комірки на етапі коректора формулюється із використанням TVD обмежувача потоку:

$$\mathbf{F}^{TVD} = \mathbf{F}^p + \phi(r) \cdot \delta \mathbf{F}, \quad \delta \mathbf{F} = \frac{1}{2}(\mathbf{F}^c - \mathbf{F}^p), \quad (14)$$

де \mathbf{F}^p – потік предиктора, \mathbf{F}^c – потік коректора, $\phi(r)$ – обмежувач потоку (minmod, superbee або Van-Leer), r – відношення варіації ввєрх за потоком до локальної варіації потоку, яке обчислюється окремо для кожної компоненти вектора потоку або, що теж саме, для кожного з трьох рівнянь РМВ.

Для трикутної комірки відношення r для кожної компоненти вектора потоку визначається наступним чином:

$$r = \begin{cases} -(\delta F \cdot \Delta l)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^2 \delta F_i \cdot \Delta l_i, & \text{if } F_h^p \geq 0 \\ (\delta F \cdot \Delta l)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^2 \delta F_j \cdot \Delta l_j, & \text{if } F_h^p < 0 \end{cases} \quad (15)$$

де сума по i – сума по двох інших ребрах лівої комірки, сума по j – сума по двох інших ребрах правої комірки. Потік позитивний, коли направлений зліва направо, згідно з Рис. 2. F_h^p – перша компонента прогнозованого потоку \mathbf{F}^p .

Внесок дифузії у зміну моментів враховується на етапі предиктора. Для дифузійних потоків через границі контрольного об'єму у (10) використовуються центральні різниці.

Вектор вільних членів \mathbf{S} в рівняннях (1, 2) враховується наступним чином. Більшість його складових додається до вектора змінних після предиктора-коректора потоків у вигляді добутку $\Delta t \mathbf{S}$, окрім двох доданків: частини, обумовленої похилом дна \mathbf{S}_b , і донного тертя \mathbf{S}_f .

Для частини, обумовленої похилом дна, для узгодженості, також використовується двоетапний метод Рунге-Кутта

$$\mathbf{S}_b = \frac{1}{2}(\mathbf{S}_b^p + \mathbf{S}_b^c) = \mathbf{S}_b^p + \frac{1}{2}(\mathbf{S}_b^c - \mathbf{S}_b^p), \quad (16)$$

де S_b^p обчислюється за значеннями змінних, отриманих після адвекції на етапі предиктора, S_b^c – за значеннями змінних, прогнозованими на етапі коректора.

Для врахування донного тертя в (1, 2), з урахуванням квадратичної апроксимації (3), використовується напівнеявна схема, за якою моменти q_x, q_y розраховуються з рівнянь:

$$\hat{q}_x - q_x = -c_b \frac{\Delta t}{h^2} \hat{q}_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}, \quad \hat{q}_y - q_y = -c_b \frac{\Delta t}{h^2} \hat{q}_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2}, \quad (17)$$

де шляпка позначає величину на наступному часовому кроці.

На обох етапах чисельної схеми може виникнути ситуація перевитрати, коли з комірки витікає більше води, ніж в ній є. В схемі використовується двоетапна корекційна процедура, за якою, спочатку, для кожної комірки обчислюється корекційний коефіцієнт R_{out} на основі порівняння загального потоку води, що залишає комірку через усі сторони F_{out} , і максимально можливого потоку $F_{out,max}$:

$$R_{out} = \begin{cases} F_{out,max}/F_{out}, & \text{if } F_{out} > F_{out,max} \\ 1, & \text{if } F_{out} \leq F_{out,max} \end{cases}, \quad (18)$$

$$F_{out} = \sum_{k=1}^3 \max(0, F_{h,k} \cdot \Delta l_k), \quad F_{out,max} = h\Delta A/\Delta t.$$

На другому етапі для кожного ребра розраховуються корекційний коефіцієнт C із використанням корекційних коефіцієнтів сусідніх комірок (R_{out}^L, R_{out}^R) і відкоригований потік маси F_h^* :

$$F_h^* = CF_h, \quad C = \begin{cases} R_{out}^L, & \text{if } F_h \geq 0 \\ R_{out}^R, & \text{if } F_h < 0 \end{cases}. \quad (19)$$

Оскільки чисельна схема РМВ явна, її стабільність обумовлюється вибором часового кроку так, щоб виконувалася умова Куранта-Фрідріхса-Леві (CFL):

$$\Delta t = Cr \cdot \min_i \left[\frac{2\Delta A_i}{\Delta l_{max,i} \cdot \left(\sqrt{u_i^2 + v_i^2} + \sqrt{gh_i} \right)} \right], \quad (20)$$

де мінімум знаходиться по всіх комірках, а $\Delta l_{max,i}$ – найдовше ребро окремої комірки. Для стійкості двовимірних схем другого порядку у часі, число Куранта Cr повинно лежати в інтервалі $0 < Cr \leq 0.5$. Для більшості практичних застосувань у моделі використовується значення $Cr = 0.4$.

Граничні умови застосовуються на обох кроках чисельної схеми розв'язання РМВ, як на етапі предиктора значень змінних, так і на етапі коректора. Гідродинамічні змінні на границях розрахункової сітки або задаються, використовуючи встановлені значення, або апроксимуються, чи зі значень змінних у прилеглих до границь комірках, чи зі значень потоків на ребрах граничних комірок, чи зі значень інваріантів Рімана на границях, що дозволяє хвилям, збудженим всередині, вільно залишати область моделювання.

Для границь із умовами, не визначеними у вхідних файлах гідродинамічної моделі COASTOX-HD, граничні умови задаються автоматично. Для РМВ задаються граничні умови із нульовою компонентою нормальної до границі швидкості.

Описані чисельні схеми реалізовано в програмному коді моделі за допомогою мови програмування FORTRAN.

5. Паралелізація алгоритмів моделі

5.1. Паралельний алгоритм для багатопроцесорних комп'ютерів на основі MPI

Як показано у попередньому розділі, чисельні схеми розв'язання РМВ гідродинамічної моделі COASTOX-HD явні, скінченно-об'ємні, що мають властивість локальності. Тобто, значення змінної на новому часовому кроці в кожному елементі розрахункової сітки обчислюється на основі значень змінних на попередньому часовому кроці з сусідніх до даного елементів.

Тому для паралелізації чисельних алгоритмів моделі для багатопроцесорних комп'ютерних систем добре підходить метод на основі геометричної декомпозиції розрахункової області та обміну повідомленнями на основі технології MPI.

Після декомпозиції початкова розрахункова область розділяється на підобласті відповідно до числа процесорів ПОС. Далі кожен процесор обчислює гідродинамічні змінні тільки в елементах своєї підобласті. Для розрахунку значень в елементах, що лежать уздовж границь підобласті, необхідні значення, що обчислюються в граничних елементах інших підобластей іншими процесорами. Для цього уздовж границь вводяться halo-структури – фіктивні елементи сітки, комірки/вузли/ребра, що відповідають дійсним граничним елементам інших процесорів. Перед обчисленнями на новому часовому кроці значення змінних в halo-елементах оновлюються значеннями, розрахованими у сусідніх підобластях. Обмін значеннями реалізується за допомогою бібліотеки передачі повідомлень MPI, яка дозволяє обмінюватися даними між процесорами або через мережеве з'єднання на ПОС із розподіленою пам'яттю, або через пам'ять на ПОС із загальною пам'яттю.

Геометрична декомпозиція розрахункової сітки у COASTOX-HD реалізована на основі бібліотеки розділу графів METIS [45]. Вона просто інтегрується в FORTRAN код моделі. На основі масиву, що задає для кожної комірки сітки індекси її сусідів, генерується дуальний граф, який розділяється за допомогою методу багаторівневого k-полосного розбиття, реалізованого у функції METIS_PartGraphKway(...). На Рис. 3 продемонстровано приклад декомпозиції розрахункової сітки моделі Чорного і Азовського морів, що була показана на Рис. 1. METIS також забезпечує балансування навантаження між процесорами ПОС, за рахунок розділення сітки на частини, що складаються з приблизно однакової кількості комірок.

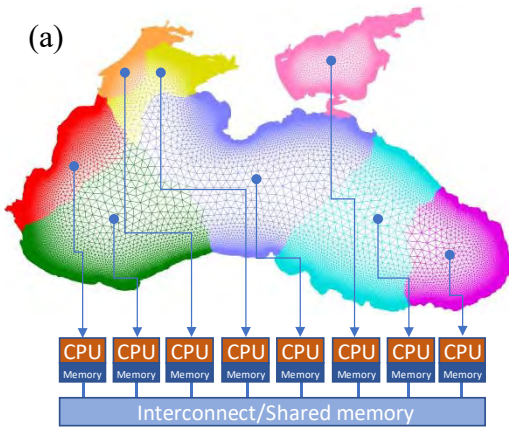


Рис. 3. Приклад розділення за допомогою бібліотеки METIS розрахункової сітки моделі Чорного і Азовського морів на 8 підобластей

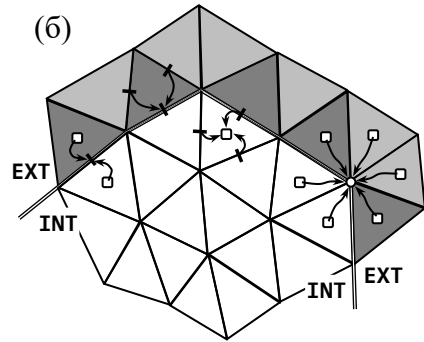


Рис. 4. Розрахункова сітка на границі між підобластями. Стрілками позначено інформаційні залежності для основних шаблонів чисельної схеми. Темно-сірим та світло-сірим кольором виділені фіктивні елементи для нижньої підобласті

Структура halo-елементів визначається шаблонами чисельних схем розрахунку гідродинамічних змінних. Інформаційні залежності шаблонів представлено на Рис. 4. Там же показані відповідні цим залежностям halo-структури.

1) Для розрахунку потоку крізь границю між комірками використовуються значення гідродинамічних змінних, заданих у центрах цих комірок. Отже, для розрахунку потоку у ребрах комірок, що лежать на міжпроцесорних границях, вводяться фіктивні комірки, які безпосередньо до них прилягають. Вони позначені темно-сірим кольором на Рис. 4.

2) Для корекції потоку крізь будь-яке ребро використовуються значення потоків з двох інших ребер комірки, що примикає до цього ребра (зліва або справа, в залежності від напрямку потоку). Відтак, для корекції потоку у ребрах комірок, що лежать на міжпроцесорних границях, необхідні фіктивні ребра – ребра фіктивних комірок, позначених темно-сірим кольором на Рис. 4.

3) Для обчислення гідродинамічних змінних у центрах комірок необхідні значення потоків крізь ребра комірки та значення цієї змінної із попереднього етапу. Тому, для цього шаблону введення фіктивних елементів сітки непотрібно.

4) Значення змінних у вузлах сітки отримуються осередненням по всіх комірках, що оточують даний вузол. Для осереднення у вузлах, що лежать на міжпроцесорних границях, необхідні фіктивні комірки, що оточують ці вузли з зовнішньої сторони. Вони повинні відповідати дійсним коміркам інших підобластей. Оскільки вже введені фіктивні комірки для розрахунку потоків, додатково вводяться фіктивні комірки, що їх доповнюють для осереднення у граничних вузлах. Вони позначені світло-сірим кольором на Рис. 4.

Завдяки локальному характеру чисельної схеми моделі необхідний тільки один ряд фіктивних елементів уздовж міжпроцесорних границь. Відповідно об'єм даних, яким обмінюються процесори, дорівнює, із точністю до множника, кількості елементів у одному halo-ряду підобласті.

Програмно обміни даними виконуються за допомогою викликів у FORTRAN коді моделі неблокованих функцій відправки та отримання повідомлень `MPI_ISEND(...)`, `MPI_IRECV(...)` сумісно із функцією завершення викликів `MPI_WAITALL(...)`. Після розділення сітки для кожного процесора визначаються сусідні процесори, а також – дійсні елементи сітки, значення з яких будуть до них відправлятися, і фіктивні елементи сітки, значення в яких будуть заповнюватися отриманими від них даними. Відповідність відправлення і отримання значень встановлюється за допомогою похідних MPI типів даних для комірок/вузлів/ребер, на основі масивів їх індексів, за допомогою функцій `MPI_TYPE_CREATE_INDEXED_BLOCK(...)` і `MPI_TYPE_COMMIT(...)`.

Для операцій на всій розрахунковій сітці, як-то пошук максимуму або мінімуму по всіх елементах розрахункової сітки, знаходження суми, використовується глобальна редукція. Кожен процесор виконує відповідну операцію на своїй підобласті, а потім значення для всієї сітки отримується зі значень для підобластей за допомогою функції глобальної редукції `MPI_ALLREDUCE(...)`.

Вивід даних здійснюється одним master-процесором. Для цього всі інші процесори відсилають йому значення у всіх елементах своєї підобласті, що реалізовано за допомогою функцій `MPI_ISEND(...)`, `MPI_IRECV(...)`, сумісно із `MPI_WAITALL(...)`, і похідних типів даних.

Загалом схема роботи паралельного алгоритму COASTOX-HD для багатопроцесорних комп'ютерів із розподіленою пам'яттю наступна:

- На початку ініціалізується MPI і створюються паралельні процеси.
- Далі всі створені паралельні процеси читають вхідні параметри, граничні умови, початкові умови та рельєф з вхідних файлів.
- Для всієї розрахункової сітки ініціалізуються глобальні змінні та структури, що задають сусідів для кожного елемента сітки.
- Відбувається декомпозиція сітки на підобласті, визначаються сусідні процесори, задаються halo-структури за допомогою похідних типів даних MPI.
- Ініціалізуються гідродинамічні змінні по підобластях.
- Стартує ітераційний процес за часом:
 - Розраховується часовий крок за умовою CFL. Для пошуку мінімального кроку по всіх підобластях використовується глобальна операція редукції `MPI_MIN`.
 - Розв'язуються РМВ:
 - Етап предиктора:
 - Розраховуються граничні гідродинамічні величини.
 - Розраховуються адвективні потоки.
 - Виконується корекція перевитрати.
 - Розраховується зміна величин за рахунок адвекції.
 - Враховуються вільні члени обумовлені похилом дна.
 - Оновлюються гідродинамічні змінні в halo-комірках.

- Етап коректора:
 - Розраховуються граничні гідродинамічні величини.
 - Розраховуються адвективні потоки.
 - Оновлюються адвективні потоки у halo-ребрах.
 - Виконується TVD корекція потоків.
 - Виконується корекція перевитрати.
 - Розраховується зміна величин за рахунок адвекції.
 - Враховуються вільні члени, обумовлені похилом дна.
- Враховується донне тертя.
- Оновлюються гідродинамічні змінні в halo-комірках.
- Якщо час дорівнює часу виведення даних:
 - Виконується збір даних зі всіх підобластей на master-процесі.
 - Master-процес записує дані у вихідні файли.
- Перевіряється чи поточний час менше часу моделювання, якщо менше – відбувається перехід до наступної часової ітерації, якщо більше – вихід з ітераційного процесу.
- Фіналізується MPI, знищуються паралельні процеси, завершується робота програми.

5.2. Паралельний алгоритм для графічних процесорів на основі OpenACC

Чисельні схеми моделі COASTOX-HD реалізовано в програмному FORTRAN коді моделі у формі циклів по елементах сітки – вузлах, комірках, ребрах комірок. Ітерації більшості циклів незалежні завдяки тому, що схеми явні, а обчислення локальні. Розрахунок значень у будь-якому елементі сітки не залежить від значень у інших елементах на поточному часовому кроці. Він залежить від значень з попереднього часового кроку у елементах сітки, що розташовані в деякому околі даного.

Відповідно, в алгоритмі COASTOX-HD багатопотокове розпаралелювання для GPU може бути реалізовано без суттєвих змін його структури. Кожному елементу сітки, чи групі елементів, ставиться у відповідність паралельний потік, що може оброблятися незалежно від інших потоків. Потоки обробляються ядрами GPU паралельно, доки, порція за порцією, не будуть опрацьовані всі елементи сітки.

Багатопотоковість реалізується в COASTOX-HD засобами OpenACC. Директиви OpenACC вставляються у FORTRAN код моделі, показуючи компілятору цикли по елементах сітки, для яких необхідно генерувати багатопотоковий код, так щоб ітерації циклів оброблялися паралельно ядрами GPU. Всередині циклів синхронізувати потоки не потрібно. Потоки синхронізуються по завершенню циклів.

Окрім цього, необхідно явно контролювати завантаження даних від центрального процесора на GPU та вивантаження даних з GPU до центрального процесора для їх подальшої обробки.

Розпаралелювання чисельних схем розв'язку РМВ реалізовано в COASTOX-HD за допомогою OpenACC наступним чином. Псевдокод, що відображає структуру FORTRAN коду моделі COASTOX-HD із директивами OpenACC, наведено на Рис. 5.

```

Program COASTOX-UN
!$ACC DATA COPYIN(V,FV,...)
Do while(Time<TimeMax)
  call ComputeTimeStepCFL(DT)
  Time=Time+DT
  call ComputeFluxFV()
  call ComputeVariableV()
  If(Time==OutputTime) Then
!$ACC UPDATE HOST(V,...)
    call Output(V,...)
  Endif
Enddo !Time
!$ACC END DATA
End program

Subroutine ComputeTimeStepCFL(DT)
!$ACC KERNELS PRESENT(...)
!$ACC LOOP REDUCTION(min:DT)
  do ic=1,NC
    ...
    DT = min(DT,...)
  enddo
!$ACC END KERNELS
End subroutine

Subroutine ComputeFluxFV()
!$ACC DATA PRESENT(EC,V,FV,...)
!$ACC KERNELS
!$ACC LOOP INDEPENDENT PRIVATE(C,icL,icR,...)
  do ie=1,NE
    icL = EC(1,ie)
    icR = EC(2,ie)
    call ComputeCoefficientC(...)
    FV(ie) = C*(V(icL) - V(icR)) ...
  enddo
!$ACC END KERNELS
!$ACC END DATA
End subroutine

Subroutine ComputeVariableV()
!$ACC DATA PRESENT(CE,A,L,V,FV,...)
!$ACC KERNELS
!$ACC LOOP INDEPENDENT PRIVATE(k,ie,tV,...)
  do ic=1,NC
!$ACC LOOP SEQ
    do k=1,3
      ie = CE(k,ic)
      tV = tV + FV(ie)*L(ie) ...
    enddo
    V(ic) = V(ic) - DT*tV/A(ic) ...
  enddo
!$ACC END KERNELS
!$ACC END DATA
End subroutine

Subroutine ComputeCoefficientC(...)
!$ACC ROUTINE SEQ
C = ...
End subroutine

```

Рис. 5. Псевдокод, що відображає структуру коду моделі COASTOX-HD із директивами OpenACC. NE – кількість ребер (edge) у розрахунковій сітці; NC – кількість комірок (cell); EC(2,NE) – масив, що задає для кожного ребра індекси сусідніх комірок; CE(3,NC) – масив із індексами ребер для кожної комірки; L(NE) – масив із довжинами ребер; A(NC) – масив із площами комірок

На самому початку центральний процесор ініціалізує масиви гідродинамічних змінних, потоків та допоміжних величин на розрахунковій сітці.

Перед стартом ітераційного циклу за часом ініціалізовані масиви завантажуються в пам'ять графічного процесора за допомогою директив !\$ACC DATA COPYIN(...).

Багатопотокова обробка циклів по комірках/вузлах/ребрах сітки визначається директивами:

```

!$ACC DATA PRESENT(...),
!$ACC KERNELS,
!$ACC LOOP INDEPENT PRIVATE(...),
!$ACC END KERNELS,
!$ACC END DATA .

```

Директива !\$ACC KERNELS визначає початок паралельної частини коду.

Директива !\$ACC LOOP INDEPENT PRIVATE(...) вказує цикл, що буде оброблятися у багатопотоковому режимі. При цьому, уточнення PRIVATE визначає локальні змінні для всіх потоків.

Директива !\$ACC END KERNELS визначає завершення паралельної частини коду та синхронізацію потоків.

Для вказівки масивів, вже завантажених в пам'ять графічного процесора, перед циклом вставляється директива `!$ACC DATA PRESENT(...)`. Директива `!$ACC END DATA` визначає завершення частини коду, для якої актуальні ці масиви.

Якщо в окремій ітерації паралельного циклу є короткий цикл, наприклад в циклі по комітках – внутрішній цикл по трьох граничних ребрах, він не розпаралелюється по потоках, а виконується окремим потоком. Це уточнюється за допомогою директиви `!$ACC LOOP SEQ` перед коротким циклом.

Для багатопотокової операції пошуку мінімального часового кроку за умовою Куранта-Фрідрікса-Леві використовується директива паралельного циклу із редукцією – `!$ACC LOOP REDUCTION(min:...)`.

Якщо у циклі присутній виклик функції, ця функція повинна бути оголошена такою, що виконується у паралельному режимі окремим потоком, за допомогою директиви `!$ACC ROUTINE SEQ`.

Перш ніж виводити змінні у зовнішні файли, масиви змінних копіюються з GPU до центрального процесора за допомогою директив `!$ACC UPDATE HOST(...)`.

6. Результати тестування

В ідеальних умовах, за відсутності накладних витрат на доставку операндів до процесорних пристроїв, розроблений паралельний алгоритм повинен прискорюватися лінійно, пропорційно кількості використовуваних процесорів. Точніше, прискорення повинне зростати за законом Амдала [46], тому що деяка кількість арифметичних операцій алгоритму залишається нерозпаралеленою.

В реальних ПОС прискорення залежить від характеру взаємодії між пам'яттю системи і процесорами. В багатоядерних комп'ютерах час витрачається на завантаження даних з загальної пам'яті до обчислювальних ядер. В ПОС із розподіленою пам'яттю об'єм даних, завантажених з пам'яті до процесора, на вузлі зменшується (завдяки чому можливе суперлінійне прискорення), але додаються витрати на обмін даними між вузлами. В GPU час витрачається на загрузку операндів з пам'яті до мультипроцесорів, але пропускна здатність пам'яті вища, ніж у багатоядерних комп'ютерів, що є додатковим фактором прискорення.

Для тестування прискорення моделі COASTOX-HD на ПОС різної архітектури її точності і ефективності було обрано декілька типових задач динаміки мілководних водойм.

Тестування проводилось на наступному обладнанні:

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

- Графічна плата NVIDIA Quadro RTX 5000, архітектури Turing, що має 3072 ядра із частотою 1.815 GHz та 16 GB оперативної пам'яті. Пікова продуктивність – 11.15 TFLOPS на одинарній точності і 348.5 GFLOPS на подвійній точності, пропускна здатність пам'яті – 448.0 GB/s. Плата

встановлена на робочій станції Dell. Для збірки виконуваного файлу для GPU використовувався компілятор PGI Fortran Compiler 19.10 Community Edition, що підтримує OpenACC директиви під Windows.

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

6.1. Цунамі

Лабораторний експеримент з нахату цунамі на складний пляж. Долина Монай.

Точність моделі COASTOX-HD у прогнозуванні цунамі перевірялась на лабораторному тесті [47], що відтворює умови цунамі 1993 року, яке вразило острів Окусірі і супроводжувалось екстремальною висотою заплеску 30 м у бухті долини Монай.

Лабораторне налаштування відповідає реальній батиметрії у прямокутній області розміром 5.448 м на 3.402 м (Рис. 6б). Вхідна хвиля з глибини 13.5 см являє собою N-подібну хвилю із ведучим поглибленням -2.5 мм і гребнем 1.6 см позаду нього (Рис. 6а). Висота хвилі вимірювалась протягом 200 с у трьох точках з координатами $(x, y) = (4.521, 1.196)$, $(4.521, 1.696)$, і $(4.521, 2.196)$ м (Рис. 6б).

Для моделювання була побудована розрахункова сітка, що складається з 12 989 вузлів і 25 553 комірок розміром від 20 см на глибині до 2.5-3 см на узбережжі (Рис. 6б). Донне тертя задавалось за формулою Шезі із коефіцієнтом $180 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$.

Моделювались перші 60 с лабораторного експерименту. Порівняння розрахованої висоти хвилі цунамі і вимірів у точках 1-3 наведено на Рис. 7.

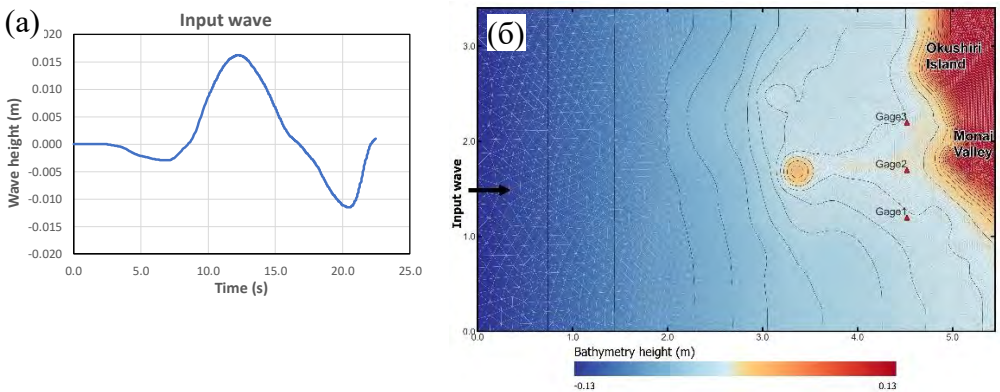


Рис. 6. а) Профіль вхідної хвилі експерименту з цунамі в долині Монай. б) Розрахункова область експерименту

Видно, що модель трохи завищує висоту і швидкість відбитої хвилі, але добре відтворює хвилю, що підходить до берега. Тому COASTOX-HD може використовуватися в задачах нахату цунамі на берег.

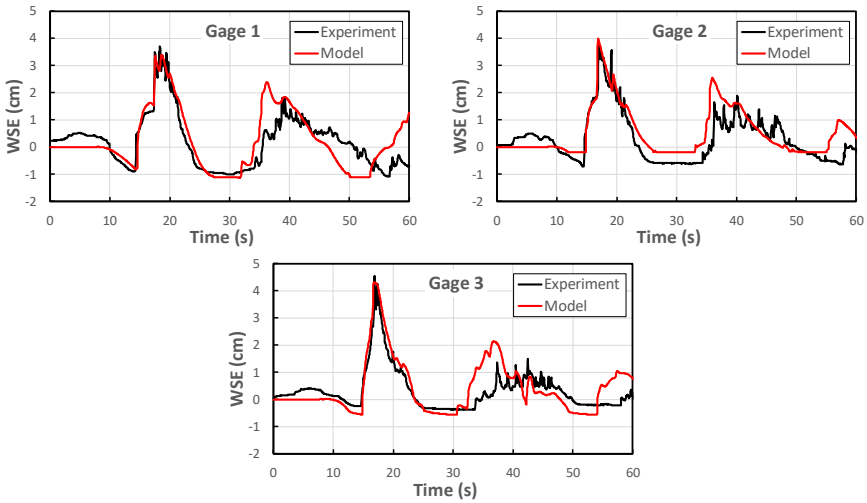


Рис. 7. Порівняння висоти хвилі, виміряної хвилемірами 1-3 під час експерименту з цунамі в долині Монай, і розрахованої моделлю в точках розташування хвилемірів

Тохокське цунамі 2011 року.

Для тестування паралельної продуктивності COASTOX-HD була обрана задача накату цунамі, викликаного Великим східно-японським землетрусом 11 березня 2011 року, на узбережжя регіону Тохоку.

Досліджувана область обмежена затокою Сендай, узбережжям префектур Міягі і Фукусіма (Рис. 8а). Для глибин затоки використовувались вільні батиметричні дані ETOPO1 роздільною здатністю 1 кутова хвилина [48], для відтворення рельєфу узбережжя – глобальні топографічні дані SRTM роздільною здатністю 3 кутових секунди (приблизно 90 м) [49].

На основі об'єднаного рельєфу було побудовано розрахункову сітку, що складається з 980 190 вузлів та 1 960 133 комірок. Розмір комірок змінюється від 90 м в прибережній зоні до 1850 м на відкритій морській границі. Донне тертя задавалось однорідним по всій області за формулою Манінга з коефіцієнтом $0.025 \text{ c/m}^{1/3}$.

У якості джерела цунамі розглядалась модель Мухарі та ін. [50]. Розподіл поля деформації донної поверхні, отриманий в [50], використовувався для миттєвої передачі деформації на поверхню води для її збурення у початковій фазі розповсюдження цунамі. Збурення трансформувалось у хвильову умову на морській границі побудованої розрахункової сітки.

Моделювались 100 хвилин динаміки хвилі цунамі від часу підходу хвилі до границі області досліджування. Результати моделювання представлені на Рис. 8б, 8в.

З порівняння висоти хвилі, виміряної на станції спостереження за припливами Сома Метеорологічного управління Японії (37°50' широти, 140°58' довготи), під час Тохокського цунамі [51], і зміни вільної поверхні води, розрахованої моделлю в місці розташування станції (Рис. 8б), випливає, що модель вірно прогнозує амплітуду хвилі цунамі і час її приходу. Порівняння промодельованої зони затоплення і зони затоплення, побудованої по результатах польових досліджень Товариством геоінформатики Японії [52] (Рис. 8в), показує, що модель також адекватно відтворює накат цунамі на узбережжя префектур Міягі і Фукусіма.

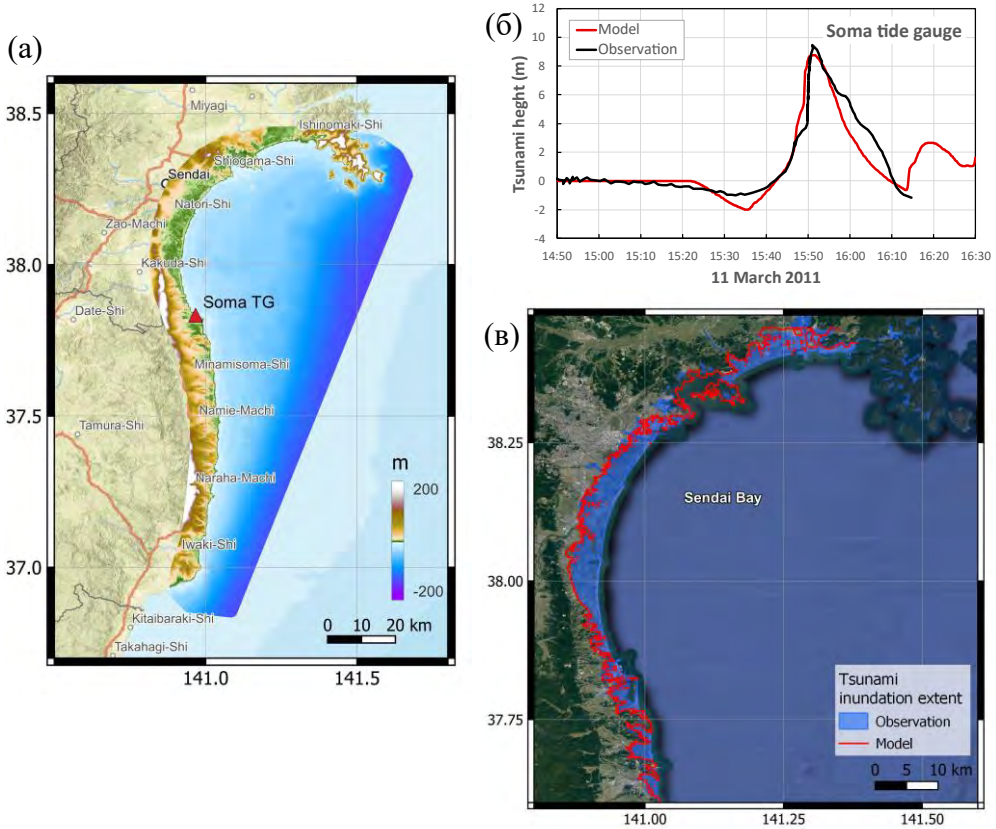


Рис. 8. а) Рельєф розрахункової області моделювання нахату Тохокського цунамі 2011 р. на узбережжя префектур Міягі і Фукусіма із зазначенням станції спостереження за припливами Сомы. б) Порівняння висоти хвилі, виміряної на станції Сомы і розрахованої моделлю в місці її розташування. в) Порівняння промодельованої зони затоплення і зони затоплення, побудованої по результатах польових досліджень

Для тестування прискорення паралельної моделі розрахунки проводились на багатоядерних процесорах робочої станції Dell і графічній карті Quadro RTX 5000. Час моделювання цунамі на робочій станції Dell багатопроесорною MPI версією COASTOX-HD дорівнює 6.54 хвилини, що у 20.44 разів швидше, ніж однопроцесорна версія із часом моделювання 133.6 хвилини. Розрахунок на Quadro RTX 5000 OpenACC версією займає лише 2.91 хвилини у подвійній точності і 1.47 хвилини у одинарній точності, що швидше однопроцесорної версії у 45.86/90.79 разів та швидше багатопроесорної у 2.24/4.44 разів, відповідно (Табл. 1, Рис. 9).

Таблиця 1 – Час розрахунку та прискорення різних версій COASTOX-HD при моделюванні 100 хвилин нахату Тохокського цунамі 2011 р. на узбережжя префектур Міягі і Фукусіма

Model	Facilities	# of processors	Time, min	Speedup vs Serial	Speedup vs MC
Serial	Dell Workstation	1	133.6	1	-
Multi-core MPI	7920	40	6.54	20.44	1
GPU OpenACC DP	Quadro RTX	1x3072	2.91	45.86	2.24
GPU OpenACC SP	5000		1.47	90.79	4.44

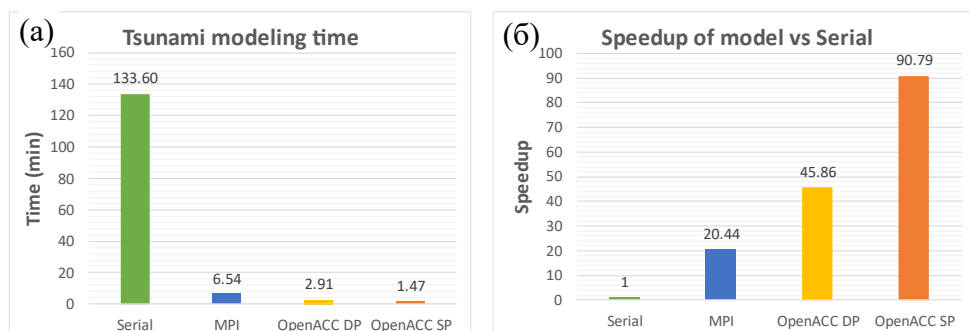


Рис. 9. Порівняння часів розрахунку (а) та прискорення (б) різних версій COASTOX-HD при моделюванні 100 хвилин накату Тохокського цунамі 2011 р.

Залежність прискорення паралельної версії моделі від розміру розрахункової сітки досліджено на прикладі задач з моделювання повеней.

6.2. Повінь

Завдяки неструктурованій розрахунковій сітці з комірками змінного розміру і стійкій чисельній схемі Годуновського типу модель COASTOX-HD здатна відтворювати характерні особливості течії під час раптових повеней, викликаних природними причинами або руйнуванням дамб чи гребель. Зокрема, розповсюдження фронту зволоження-осушення на складному рельєфі, ударні хвилі, взаємодію течії з перешкодами.

Для дослідження впливу розміру розрахункової сітки на прискорення паралельної версії моделі була обрана задача затоплення берегів р. Дніпро в м. Києві під час весняного водопілля 1979 р.

Весняне водопілля у басейні Дніпра неодноразово супроводжувалось високими повенями у м. Києві, із затопленням його берегів та міської забудови. Для прогнозу наслідків київських повеней в ПММС була розроблена система моделювання паводків на р. Дніпро на ділянці від гирла р. Десна та греблі Київської ГЕС до греблі Канівської ГЕС [15].

Об'єднана цифрова модель рельєфу (ЦМР) дна річок і берегів Києва роздільною здатністю 10 м була створена центром «ГІС Аналітик» на основі даних ехолотної зйомки глибин Дніпра і Десни 2006 р., растрової статистичної поверхні з розрізненням пікселя 10 м, отриманої за даними аерофотозйомки території міста 2010 р., і актуальних даних міського рельєфу м. Києва з розрізненням пікселя 5 м за результатами лідарної зйомки 2020 р. Всі значення приведені до Балтійської системи висот (БС).

На її основі була побудована розрахункова сітка, з 77 111 вузлів та 152 112 комірок, що варіюються за розмірами від 50 м біля русел річок до 300 м на сухих границях області (Рис. 10а). Сітка побудована з ущільненням в районі русла Дніпра та островів, в неї також внесені основні особливості рельєфу берегів: захисні дамби, насипи залізничних шляхів та автодоріг.

Значення коефіцієнта тертя Манінга в розрахунковій області задавались від 0.015 $\text{с/м}^{1/3}$ у Канівському вдсх. до 0.026 $\text{с/м}^{1/3}$ у верхній частині Дніпра, тоді як на суходолі – в діапазоні 0.1-0.15 $\text{с/м}^{1/3}$ (Рис. 10а).

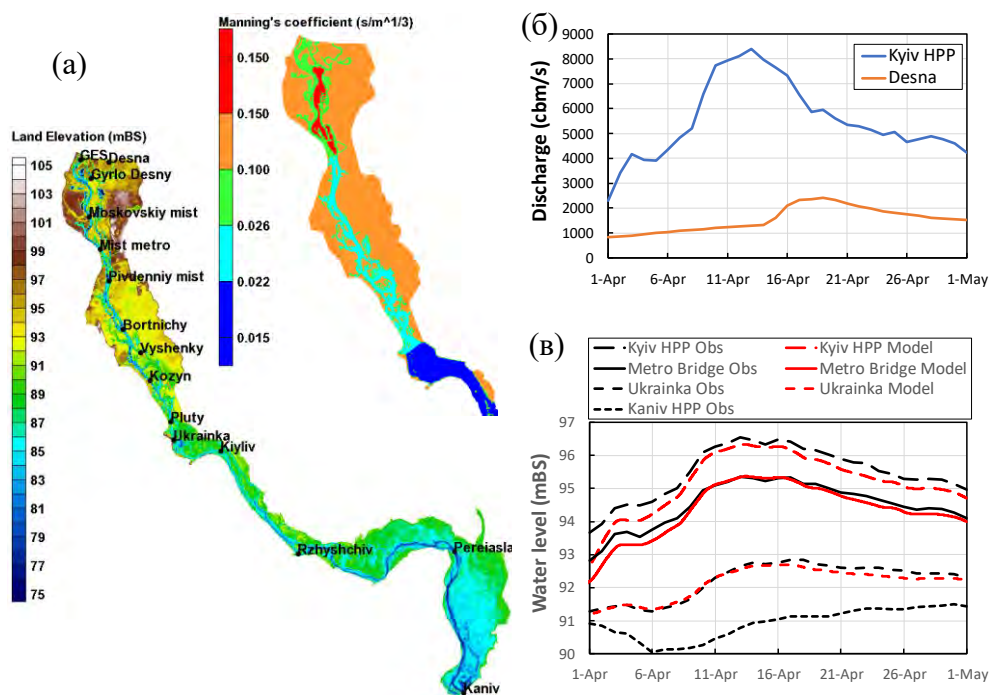


Рис. 10. а) Рельєф розрахункової області (в БС) і розподіл коефіцієнта Манінга для задачі затоплення берегів р. Дніпро в м. Києві під час весняного водопілля 1979 р. б) Виміряні витрати річок Дніпро і Десна під час водопілля 1979 р. в) Рівні води (БС) біля греблі Київської ГЕС, мосту Метро, Українки, Канівської ГЕС за спостереженнями та в моделі

Дані по гідрографіях річок та рівнях води на гідропостах були надані Українським гідрометеорологічним центром (Рис. 10б, 10в). Для моделювання на границях задавались, на вхідних – витрата Десни і скид Київської ГЕС, на вихідній – рівень води у верхньому б'єфі Канівської ГЕС. У якості початкових умов рівень води уздовж всієї ділянки Дніпра прирівнювався початковому рівню Канівського водосховища – 90.91 м.

З порівняння промодельованих і спостережених рівнів води (Рис. 10в) слідує, що модель вірно відтворює еволюцію рівня Дніпра під час повені 1979 р. уздовж всієї досліджуваної ділянки, від греблі Київської до греблі Канівської ГЕС.

Для дослідження впливу розміру розрахункової сітки на ефективність паралельної версії моделі з базової розрахункової сітки було створено ще три сітки послідовно більшого розміру шляхом розділення кожного ребра сітки навпіл і кожної трикутної комірки на чотири трикутники. Створені чотири сітки мають довжину ребер базових трикутників уздовж русла Дніпра 50 м, 25 м, 12.5 м і 6.25 м та розміри: 77 092/152 074, 306 257/608 296, 1 220 809/2 433 184, 4 874 801/9 732 736 вузлів/комірок.

Тестування проводилось на багатоядерних процесорах робочої станції Dell і графічних картах Quadro RTX 5000 і GeForce RTX 3080. Для всіх сценаріїв, окрім одного, оцінювався час моделювання 1 дня повені 1979 р. Для найбільшої сітки час моделювання на 1 ядрі робочої станції завеликий. Він оцінювався за часом моделювання 1 години повені. Результати тестування зібрані в Табл. 2.

Таблиця 2. Час обчислення 1 дня паводку 1979 г. у м. Києві на багатоядерній робочій станції і графічних процесорах, для розрахункових сіток різної деталізації. Прискорення паралельних версій COASTOX-HD порівняно з непаралельною. Прискорення GPU версії на графічних процесорах порівняно з MPI версією на робочій станції

Δl , m	# of Cells	Time, h				Speedup vs Serial			Speedup vs MC	
		Dell 7920		RTX 5000	RTX 3080	Dell MC	RTX 5000	RTX 3080	RTX 5000	RTX 3080
		Serial	MC							
50	152 074	1.25	0.055	0.037	0.020	22.63	33.57	62.72	1.48	2.77
25	608 296	10.88	0.50	0.19	0.092	21.72	57.54	118.33	2.65	5.45
12.5	2 433 184	113.9	5.28	1.23	0.65	21.58	92.77	174.49	4.30	8.09
6.25	9 732 736	972.5	50.04	10.23	5.38	19.43	95.03	180.64	4.89	9.29

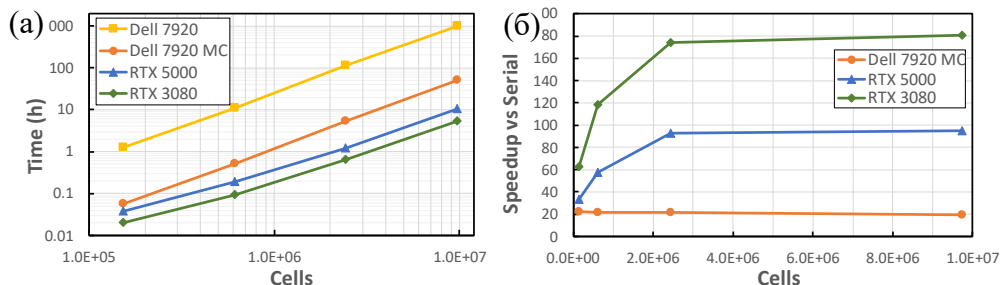


Рис. 11. а) Порівняння часів розрахунку різних версій COASTOX-HD при моделюванні 1 дня паводку 1979 г. у м. Києві на багатоядерній робочій станції і графічних процесорах. б) Прискорення MPI та GPU версій COASTOX-HD порівняно з непаралельною версією

Час обчислення задачі на робочій станції, як у паралельному, так і у непаралельному режимі, має близьку до степеневій залежність від розміру розрахункової сітки (Рис. 11а). Це пов'язано з тим, що чисельна схема розв'язку РМВ в моделі явна, часовий крок обирається з умови Куранта, тому кількість обчислень обернено пропорційна до куба лінійних розмірів комірки. А оскільки кількість комірок обернено пропорційна квадрату лінійних розмірів, кількість обчислень і час приблизно пропорційні кількості комірок у степені $3/2$.

Залежність часу моделювання на графічних процесорах від розміру сітки дещо повільніша за степінь $3/2$. Саме моделювання на обох використаних у тестуванні графічних процесорах швидше, ніж на робочій станції. Навіть для самої великої сітки, з близько 10 мільйонами комірок, час моделювання менший реального часу і модель може бути використана для прогнозу київських повеней в оперативному режимі.

Прискорення MPI версії моделі слабо залежить від розміру сітки, трохи зменшуючись при зростанні кількості комірок (Рис. 11б). Прискорення GPU версії навпаки різко зростає зі збільшенням розміру сітки до певної її величини (декілька мільйонів комірок), далі зріст уповільнюється, досягаючи насичення (Рис. 11б).

GeForce RTX 3080 на всіх сітках приблизно в 2 рази швидша за Quadro RTX 5000. Порівняння продуктивності відеокарт, 29.77 TFLOPS проти 11.15 TFLOPS, і пропускної здатності пам'яті, 760.3 GB/s проти 448.0 GB/s, підтверджує припущення, що для розробленої паралельної моделі, чисельні схеми якої відносяться до алгоритмів з невисокою обчислювальною інтенсивністю, пропускна здатність пам'яті є більш важливим обмежуючим фактором прискорення, чим продуктивність.

7. Висновки

Розроблена паралельна модель гідродинаміки мілкої води на неструктурованих сітках COASTOX-HD, з комплексу моделей COASTOX-UN, дозволяє обчислювати великі задачі гідродинаміки річкових систем і прибережної зони моря на багатопроцесорних комп'ютерних системах і графічних процесорах у десятки разів швидше порівняно з непаралельною моделлю. При цьому моделювання на сучасних графічних процесорах може бути у декілька разів швидше, ніж на багатоядерній робочій станції. В підсумку, обчислення задач з розрахунковими сітками з декількох мільйонів комірок може бути в рази швидшим, ніж реальний час. Таким чином, створена паралельна гідродинамічна модель може бути основою систем оперативного прогнозу надзвичайних ситуацій, пов'язаних із гідродинамікою поверхневих вод, таких, наприклад, як високі водопілля, дощові паводки, штормові нагони або цунамі. Такі системи не потребують наявності суперкомп'ютерів і можуть бути розвернуті на персональних комп'ютерах або ноутбуках, обладнаних сучасними високопродуктивними графічними картами.

Розвинений паралельний скінченно-об'ємний алгоритм розв'язку PMB на базі гібридного підходу MPI+OpenACC також є основою розпаралелення чисельних схем розв'язку рівнянь інших моделей системи COASTOX-UN: моделі переносу наносів і морфодинаміки та моделі транспорту радіонуклідів і радіоактивного забруднення дна водою. Результати розпаралелення цих моделей і структура взаємодії всіх моделей системи COASTOX-UN будуть представлені у наступних публікаціях.

Розвинений гібридний MPI+OpenACC алгоритм, з геометричною декомпозицією розрахункової сітки на підобласті та багатопотоковістю всередині підобластей, може бути адаптований до використання декількох графічних процесорів, що пов'язані через загальну пам'ять або мережевим з'єднанням. Це буде напрямком подальшого дослідження та розвитку системи моделей COASTOX-UN.

Подяки

Дослідження частково підтримано Національним фондом досліджень України, проєкт № 2020.01/0421.

Автор щиро вдячний науковому керівнику, професору Железняку М.Й. (Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University, Japan) за запропонований напрямок дослідження, плідне обговорення результатів роботи, зауваження та поради під час підготовки матеріалу статті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zheleznyak, M. J., Demchenko, R. I., Khursin, S. L., Kuzmenko, Y. I., Tkulich, P. V., & Vitiuk, N. Y. (1992). Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripyat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident. *Science of The Total Environment*, 112(1), 89–114. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90241-j](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90241-j)
2. Zheleznyak, M. (1997). The mathematical modelling of radionuclide transport by surface water flow from the vicinity of the Chernobyl nuclear power plant. *Condensed Matter Physics*, 12, 37-49. <https://doi.org/10.5488/CMP.12.37>
3. Zheleznyak, M., Shepeleva, T., Sizonenko, V., Mezhueva, I. (1997). Simulation of countermeasures to diminish radionuclide fluxes from the Chernobyl zone via aquatic pathways. *Radiation Protection Dosimetry*, 73(1–4), 181–186. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032129>
4. Zheleznyak, M., Kivva, S., Pylypenko, O., Sorokin, M. (2022). Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems. In: Nanba, K., Konoplev, A., Wada, T. (eds) *Behavior of Radionuclides in the Environment III*. Springer, Singapore. 2022, 199–252. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6799-2_11
5. DHI. (2014). MIKE 21 Flow Model: Hydrodynamic Module User Guide. Danish Hydraulic Institute Water and Environment: Hørsholm, Denmark, p. 132.
6. Ata, R., Goeury, C., Lang, P., Desombre, J., Hervouet, J.M. (2014). TELEMAC MODELLING SYSTEM - Release 7.0 - USER MAN-UAL.
7. Sánchez, A., Wu W., Li H., Brown M. E., Reed C. W., Rosati J. D., and Demirbilek Z. (2014). Coastal Modeling System: Mathematical Formulations and Numerical Methods. ERDC/CHL-TR-14-2. U.S. Army ERDC, Vicksburg, MS.
8. Fenical, S., Kolomiets, P., Kivva, S., Zheleznyak, M. (2007). Numerical Modeling of Passing Vessel Impacts on Berthed Vessels and Shoreline. *Coast. Eng. 2006*, 1234-1246.
9. Zheleznyak, M., Khomitsky, V., Kivva, S., Demchenko, R., Kolomiets, P., Shepeleva, T. (2006). Laboratory and Numerical Studies of Waves, Currents and Sediment Transport at the Deepwater Navigation Channel in the “Bystroe” Arm of the Danube Delta. *ICCE-2006, Book of abstracts*, San Diego, California, USA, 2–8 Sept 2006, 1271, p. 400.
10. Kivva, S., Zheleznyak, M. (2008). Modelling of the Risks of the Sidoarjo Mud Flow, Indonesia. *4th International Congress on Environmental Modelling and Software*. Barcelona, Catalonia, Spain. July 2008, pp. 1500-1507.
11. Kolomiets P., Zheleznyak M., Tkulich P. (2010). Dynamical Downscaling of Storm Surges in South-China Sea and Singapore Strait. *Storm Surges Congress*, 13-17 September 2010, University of Hamburg, Germany.
12. Дикий П.В., Железняк М.Й., Коломієць П.С., Ківва С.Л., Сорокін М.В. (2013). Моделювання впливу регіональних змін клімату на ерозію берегів Західного Криму. *Тези доповідей Восьмої міжнародної науково-практичної конференції Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2013*, Чернівці-Жукин, 24-28 червня 2013, с. 56-59.
13. Nanba, K., Zheleznyak, M., Kivva, S., Konoplev, A., Maderich, V., Koshebutsky, V., Gallego, E., Papush, L., Mikhalskyi, O. (2016). Implementation of hydrological dispersion module of JRODOS for the assessment of ¹³⁷Cs transport and fate in rivers, reservoirs and ponds of the Fukushima Prefecture. *Radioprotection*, 51(HS2), S145–S148. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2016052>
14. Zheleznyak, M., Kivva, S., Ievdin, I., Boyko, O., Kolomiets, P., Sorokin, M., Mikhalskyi, O., Gheorghiu, D. (2016). Hydrological dispersion module of JRODOS: renewed chain of the emergency response models of radionuclide dispersion through watersheds and rivers. *Radioprotection*, 51(HS2), S129–S131. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2016048>
15. Бойко В.М., Євдін Є.О., Железняк М.Й., Коломієць П.С., Ішук О.О. (2012). Особливості формування весняного стоку Дніпра та моделювання зон затоплення у межах м. Києва на основі сучасної гідролого-гідрравлічної моделі. *Гідрологія, Гідрохімія, Гідроecологія*. Т. 1(26). с. 55-63.

16. Zheleznyak, M., Kolomiets, P., Dzijuba, N., Ievdin, I., Sorokin, M., Denisov, N., Ischuk, O., and Koeppel, S. (2015). Numerical Modeling for Flood Mapping under Climate Change Impacts: Transboundary Dniester River Study. *EGU General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 17, EGU2015-9361.
17. Pylypenko, O., Zheleznyak, M., Boyko, O., Kovalets, I., Kivva, S., Khalchenkov, A., Mikhalsky, O., Sorokin, M. (2018). Flood forecasting and flood inundation mapping system developed for Ukrainian parts of Prut and Siret river basins within EAST AVERT project. *EGU General Assembly 2018, Geophys. Res. Abstr.*, Vol. 20, EGU2018-10652-2.
18. Сорокін М.В. (2011). Паралельний явний кінцево-різницевий алгоритм розв'язку рівнянь моделі двовимірної гідроморфодинаміки прибережної зони на неструктурованих сітках. *Тези доповідей Шостої науково-практичної конференції з міжнародною участю Математичне та імітаційне моделювання систем, МОДС 2011*, Чернігів, 27-30 червня 2011, с. 103-105.
19. Sorokin, M., Zheleznyak, M., Kivva, S., Kolomiets, P., and Pylypenko, O. (2020). High performance computing of waves, currents and contaminants in rivers and coastal areas of seas on multi-processors systems and GPUs, *EGU General Assembly 2020*, 4–8 May 2020, EGU2020-11372, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11372>
20. Leandro, J., Chen, A. S., & Schumann, A. (2014). A 2D parallel diffusive wave model for floodplain inundation with variable time step (P-DWave). *Journal of Hydrology*, 517, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.020>
21. Zhang, S., Z. Xia, R. Yuan, and X. Jiang. (2014). Parallel Computation of a Dam-Break Flow Model using OpenMP on a Multi-Core Computer. *J. Hydrol.* 512, 126–133.
22. Zhang, S., Li, W., Jing, Z., Yi, Y., & Zhao, Y. (2017). Comparison of Three Different Parallel Computation Methods for a Two-Dimensional Dam-Break Model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2017/1970628>
23. Liu, J.-Y., Smith, M. R., Kuo, F.-A., & Wu, J.-S. (2015). Hybrid OpenMP/AVX acceleration of a Split HLL Finite Volume Method for the Shallow Water and Euler Equations. *Computers & Fluids*, 110, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.11.01>
24. Ginting, B.; Mundani, R.P.; Rank, E. (2018). Parallel simulations of shallow water solvers for modelling overland flows. *In Proceedings of the 13th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2018)*, EPiC Series in Engineering, Palermo, Italy, 1–6 July 2018; La Loggia, G., Freni, G., Puleo, V., De Marchis, M., Eds.; Volume 3, pp. 788–799.
25. Dietrich, J.C., Zijlema, M., Westerink, J.J., Holthuijsen, L.H., Dawson, C.N., Luettich, R.A. Jr., Jensen, R.E., Smith J.M., Stelling G.S., Stone G.W. (2011). Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering*, 58, 45–65. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.001>
26. Taylor, A., Liu, H. (2020). Latest Developments in the NWS' Sea Lake and Overland Surges from Hurricanes Model. *18th Symposium on the Coastal Environment*, Boston, MA, Amer. Meteor. Soc., 4.1, 8 pp.
27. Rao, P. (2005). A parallel RMA2 model for simulating large-scale free surface flows. *Environmental Modelling & Software*, 20(1), 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.12.008>
28. Villanueva, I., Wright, N.G. (2006). An Efficient Multi-processor Solver for the 2D Shallow Water Equations. *Hydroinformatics 2006*, Nice, France.
29. Neal, J. C., Fewtrell, T. J., Bates, P. D., & Wright, N. G. (2010). A comparison of three parallelisation methods for 2D flood inundation models. *Environmental Modelling & Software*, 25(4), 398–411. <https://doi.org/j.envsoft.2009.11.007>
30. Shang, Z. (2014). High performance computing for flood simulation using Telemac based on hybrid MPI/OpenMP parallel programming. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 05(04), 1472001. <https://doi.org/10.1142/s1793962314720015>

31. Williams S.W., Waterman A., Patterson D.A. (2008). Roofline: An Insightful Visual Performance Model for Floating-Point Programs and Multicore Architectures. *Technical Report No. UCB/EECS-2008-134*.
32. Zhang, Y., & Jia, Y. (2013). Parallelized CCHE2D flow model with CUDA Fortran on Graphics Processing Units. *Computers & Fluids*, 84, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.06.021>
33. Huxley, C., Syme, B. (2016). TUFLOW GPU - Best Practice Advice for Hydrologic and Hydraulic Model Simulations. In *Proceedings of the 37th Hydrology and Water Resources Symposium (HWRS)*, Queenstown, New Zealand.
34. García-Feal O., González-Cao J., Gómez-Gesteira M., Cea L., Domínguez J.M., Formella A. (2018). An Accelerated Tool for Flood Modelling Based on Iber. *Water*, 10(10), 1459. <https://doi.org/10.3390/w10101459>
35. Morales-Hernández, M., Sharif, M. B., Kalyanapu, A., Ghafoor, S. K., Dullo, T. T., Gangrade, S., Kao S.-C., Norman M.R., Evans, K. J. (2021). TRITON: A Multi-GPU open source 2D hydrodynamic flood model. *Environmental Modelling & Software*, 141, 105034. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105034>
36. Hoshino, T., Maruyama, N., Matsuoka, S., & Takaki, R. (2013). CUDA vs OpenACC: Performance Case Studies with Kernel Benchmarks and a Memory-Bound CFD Application. *2013 13th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud, and Grid Computing*, 136-143. <https://doi.org/10.1109/ccgrid.2013.12>
37. Hu, X., Song, L. (2018). Hydrodynamic modeling of flash flood in mountain watersheds based on high-performance GPU computing. *Nat Hazards*, 91, 567–586. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3141-7>
38. Liu Q., Qin Y., Li G. (2018). Fast Simulation of Large-Scale Floods Based on GPU Parallel Computing. *Water*, 10(5), 589. <https://doi.org/10.3390/w10050589>
39. Xia, Y., Luo, L., Luo, H., Lou, J., Edwards, J. R., & Mueller, F. (2014). On the Multi-GPU Computing of a Reconstructed Discontinuous Galerkin Method for Compressible Flows on 3D Hybrid Grids. *7th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2014-3081>
40. Xue, W., Jackson, C. W., & Roy, C. J. (2018). Multi-CPU/GPU parallelization, optimization and machine learning based autotuning of structured grid CFD codes. *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*. <https://doi.org/10.2514/6.2018-0362>
41. Zia A., Banihashemi M.A. (2008). Simple efficient algorithm (SEA) for shallow water flows with shock wave on dry and irregular beds. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 56(11), 2021–2043. <https://doi.org/10.1002/fld.1585>
42. Begnudelli L., Sanders B.F. (2006). Unstructured grid finite-volume algorithm for shallow-water flow and scalar transport with wetting and drying. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(4), 371-384. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:4\(371\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:4(371))
43. Toro, E.F., Spruce, M. & Speares, W. (1994). Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver. *Shock Waves*, 4(1), 25–34. <https://doi.org/10.1007/BF01414629>
44. Roe P.L. (1981). Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes. *Journal of Computational Physics*, 43(2), 357-372. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90128-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90128-5)
45. Karypis G., Kumar V. METIS: A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes, and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices, Version 4.0. *Technical Report*, Dept. of Computer Science and Eng. University of Minnesota, Minneapolis, MN. 1998.
46. Amdahl, G. M. (1967). Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large-Scale Computing Capabilities. *AFIPS Conference Proceedings*, 30, 483–485. <https://doi.org/10.1145/1465482.1465560>
47. Synolakis C.E., Bernard E.N., Titov V.V., Kânoğlu U., and González F.I. (2007). Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models. *NOAA Tech. Memo. OAR PMEL-135*, NOAA/PMEL, Seattle, WA, 2007, 55 pp.

48. Amante, C., Eakins, B. W. (2009). Etopo1 1 arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*, March 2009, 19 pp.
49. Jarvis A., Reuter, H. I., Nelson, A., and Guevara, E.: Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture. <http://srtm.csi.cgiar.org>
50. Muhari, A., Imamura, F., Suppasri, A., & Mas, E. (2012). Tsunami arrival time characteristics of the 2011 East Japan Tsunami obtained from eyewitness accounts, evidence and numerical simulation. *Journal of Natural Disaster Science*, 34(1), 91–104. <https://doi.org/10.2328/jnds.34.91>
51. Japan Meteorological Agency, Tsunami observation data at Soma. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/13a/201104131600.html>
52. Japan Society of Geoinformatics, Inundation Areas of 2011 Tsunami in East Japan. <http://www.jsgi-map.org/tsunami/>

Стаття надійшла до редакції 22.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 09.06.2023

REFERENCES

1. Zheleznyak, M. J., Demchenko, R. I., Khursin, S. L., Kuzmenko, Y. I., Tkalic, P. V., & Vitiuk, N. Y. (1992). Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripyat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident. *Science of The Total Environment*, 112(1), 89–114. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90241-j](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90241-j)
2. Zheleznyak, M. (1997). The mathematical modelling of radionuclide transport by surface water flow from the vicinity of the Chernobyl nuclear power plant. *Condensed Matter Physics*, 12, 37-49. <https://doi.org/10.5488/CMP.12.37>
3. Zheleznyak, M., Shepeleva, T., Sizonenko, V., Mezheva, I. (1997). Simulation of countermeasures to diminish radionuclide fluxes from the Chernobyl zone via aquatic pathways. *Radiation Protection Dosimetry*, 73(1–4), 181–186. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032129>
4. Zheleznyak, M., Kivva, S., Pylypenko, O., Sorokin, M. (2022). Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems. In: Nanba, K., Konoplev, A., Wada, T. (eds) *Behavior of Radionuclides in the Environment III*. Springer, Singapore. 2022, 199–252. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6799-2_11.
5. DHI. (2014). MIKE 21 Flow Model: Hydrodynamic Module User Guide. Danish Hydraulic Institute Water and Environment: Hørsholm, Denmark, p. 132.
6. Ata, R., Goeruy, C., Lang, P., Desombre, J., Hervouet, J.M. (2014). TELEMAC MODELLING SYSTEM - Release 7.0 - USER MAN-UAL.
7. Sánchez, A., Wu W., Li H., Brown M. E., Reed C. W., Rosati J. D., and Demirbilek Z. (2014). Coastal Modeling System: Mathematical Formulations and Numerical Methods. ERDC/CHL-TR-14-2. U.S. Army ERDC, Vicksburg, MS.
8. Fenical, S., Kolomiets, P., Kivva, S., Zheleznyak, M. (2007). Numerical Modeling of Passing Vessel Impacts on Berthed Vessels and Shoreline. *Coastal Engineering 2006*, 1234-1246.
9. Zheleznyak, M., Khomitsky, V., Kivva, S., Demchenko, R., Kolomiets, P., Shepeleva, T. (2006). Laboratory and Numerical Studies of Waves, Currents and Sediment Transport at the Deepwater Navigation Channel in the “Bystroe” Arm of the Danube Delta. *ICCE-2006, Book of abstracts*, San Diego, California, USA, 2–8 September 2006, No: 1271, p. 400.
10. Kivva, S., Zheleznyak, M. (2008). Modelling of the Risks of the Sidoarjo Mud Flow, Indonesia. *4th International Congress on Environmental Modelling and Software*. Barcelona, Catalonia, Spain. July 2008, pp. 1500-1507.
11. Kolomiets P., Zheleznyak M., Tkalic P. (2010). Dynamical Downscaling of Storm Surges in South-China Sea and Singapore Strait. *Storm Surges Congress*, 13-17 September 2010, University of Hamburg, Germany.

12. Dikiy P.V., Zheleznyak M.J., Kolomiets P.S., Kivva S.L., Sorokin M.V. (2013). Modeling the impact of regional climate change on coastal erosion in the Western Crimea. *Book of Abstracts of the Eighth International scientific-practical conference "Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2013"*, Chernihiv-Zhukyn, June 24-28 2013, pp. 56-59 [in Ukrainian].
13. Nanba, K., Zheleznyak, M., Kivva, S., Konoplev, A., Maderich, V., Koshebutsky, V., Gallego, E., Papush, L., Mikhalskyi, O. (2016). Implementation of hydrological dispersion module of JRODOS for the assessment of ¹³⁷Cs transport and fate in rivers, reservoirs and ponds of the Fukushima Prefecture. *Radioprotection*, 51(HS2), S145–S148. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2016052>
14. Zheleznyak, M., Kivva, S., Ievdin, I., Boyko, O., Kolomiets, P., Sorokin, M., Mikhalskyi, O., Gheorghiu, D. (2016). Hydrological dispersion module of JRODOS: renewed chain of the emergency response models of radionuclide dispersion through watersheds and rivers. *Radioprotection*, 51(HS2), S129–S131. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2016048>
15. Boyko V.M., Ievdin I.O., Zheleznyak M.J., Kolomiets P.S., Ischuk O.O. (2012). Peculiarities of spring runoff formation of the Dnieper River and modeling of flood zones within the city of Kiev on the basis of modern hydrological and hydraulic model. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 1(26), 55-63 [in Ukrainian].
16. Zheleznyak, M., Kolomiets, P., Dzijuba, N., Ievdin, I., Sorokin, M., Denisov, N., Ischuk, O., and Koepfel, S. (2015). Numerical Modeling for Flood Mapping under Climate Change Impacts: Transboundary Dniester River Study. *EGU General Assembly 2015, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 17, EGU2015-9361.
17. Pylypenko, O., Zheleznyak, M., Boyko, O., Kovalets, I., Kivva, S., Khalchenkov, A., Mikhalsky, O., Sorokin, M. (2018). Flood forecasting and flood inundation mapping system developed for Ukrainian parts of Prut and Siret river basins within EAST AVERT project. *EGU General Assembly 2018, Geophys. Res. Abstr.*, Vol. 20, EGU2018-10652-2.
18. Sorokin M.V. (2011). A parallel explicit finite-difference algorithm for solving the equations of the two-dimensional hydromorphodynamics model of the coastal zone on unstructured grids. *Book of Abstracts of the Sixth International scientific-practical conference "Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2011"*, Chernihiv, June 27-30 2011, pp. 103-105 [in Ukrainian].
19. Sorokin, M., Zheleznyak, M., Kivva, S., Kolomiets, P., and Pylypenko, O. (2020). High performance computing of waves, currents and contaminants in rivers and coastal areas of seas on multi-processors systems and GPUs, *EGU General Assembly 2020*, 4–8 May 2020, EGU2020-11372, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11372>
20. Leandro, J., Chen, A. S., & Schumann, A. (2014). A 2D parallel diffusive wave model for floodplain inundation with variable time step (P-DWave). *Journal of Hydrology*, 517, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.020>
21. Zhang, S., Z. Xia, R. Yuan, and X. Jiang. (2014). Parallel Computation of a Dam-Break Flow Model using OpenMP on a Multi-Core Computer. *J. Hydrol.* 512, 126–133.
22. Zhang, S., Li, W., Jing, Z., Yi, Y., & Zhao, Y. (2017). Comparison of Three Different Parallel Computation Methods for a Two-Dimensional Dam-Break Model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2017/1970628>
23. Liu, J.-Y., Smith, M. R., Kuo, F.-A., & Wu, J.-S. (2015). Hybrid OpenMP/AVX acceleration of a Split HLL Finite Volume Method for the Shallow Water and Euler Equations. *Computers & Fluids*, 110, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.11.01>
24. Ginting, B.; Mundani, R.P.; Rank, E. (2018). Parallel simulations of shallow water solvers for modelling overland flows. *In Proceedings of the 13th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2018)*, EPiC Series in Engineering, Palermo, Italy, 1–6 July 2018; La Loggia, G., Freni, G., Puleo, V., De Marchis, M., Eds.; Volume 3, pp. 788–799.
25. Dietrich, J.C., Zijlema, M., Westerink, J.J., Holthuijsen, L.H., Dawson, C.N., Luettich, R.A. Jr., Jensen, R.E., Smith J.M., Stelling G.S., Stone G.W. (2011). Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering*, 58, 45–65. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.001>

26. Taylor, A., Liu, H. (2020). Latest Developments in the NWS' Sea Lake and Overland Surges from Hurricanes Model. *18th Symposium on the Coastal Environment*, Boston, MA, Amer. Meteor. Soc., 4.1, 8 pp.
27. Rao, P. (2005). A parallel RMA2 model for simulating large-scale free surface flows. *Environmental Modelling & Software*, 20(1), 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.12.008>
28. Villanueva, I., Wright, N.G. (2006). An Efficient Multi-processor Solver for the 2D Shallow Water Equations. *Hydroinformatics 2006*, Nice, France.
29. Neal, J. C., Fewtrell, T. J., Bates, P. D., & Wright, N. G. (2010). A comparison of three parallelisation methods for 2D flood inundation models. *Environmental Modelling & Software*, 25(4), 398–411. <https://doi.org/j.envsoft.2009.11.007>
30. Shang, Z. (2014). High performance computing for flood simulation using Telemac based on hybrid MPI/OpenMP parallel programming. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 05(04), 1472001. <https://doi.org/10.1142/s1793962314720015>
31. Williams S.W., Waterman A., Patterson D.A. (2008). Roofline: An Insightful Visual Performance Model for Floating-Point Programs and Multicore Architectures. *Technical Report No. UCB/EECS-2008-134*.
32. Zhang, Y., & Jia, Y. (2013). Parallelized CCHE2D flow model with CUDA Fortran on Graphics Processing Units. *Computers & Fluids*, 84, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.06.021>
33. Huxley, C., Syme, B. (2016). TUFLOW GPU - Best Practice Advice for Hydrologic and Hydraulic Model Simulations. *In Proceedings of the 37th Hydrology and Water Resources Symposium (HWRS)*, Queenstown, New Zealand.
34. García-Feal O., González-Cao J., Gómez-Gesteira M., Cea L., Domínguez J.M., Formella A. (2018). An Accelerated Tool for Flood Modelling Based on Iber. *Water*, 10(10), 1459. <https://doi.org/10.3390/w10101459>
35. Morales-Hernández, M., Sharif, M. B., Kalyanapu, A., Ghafoor, S. K., Dullo, T. T., Gangrade, S., Kao S.-C., Norman M.R., Evans, K. J. (2021). TRITON: A Multi-GPU open source 2D hydrodynamic flood model. *Environmental Modelling & Software*, 141, 105034. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105034>
36. Hoshino, T., Maruyama, N., Matsuoka, S., & Takaki, R. (2013). CUDA vs OpenACC: Performance Case Studies with Kernel Benchmarks and a Memory-Bound CFD Application. *2013 13th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud, and Grid Computing*, 136-143. <https://doi.org/10.1109/ccgrid.2013.12>
37. Hu, X., Song, L. (2018). Hydrodynamic modeling of flash flood in mountain watersheds based on high-performance GPU computing. *Nat Hazards*, 91, 567–586. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3141-7>
38. Liu Q., Qin Y., Li G. (2018). Fast Simulation of Large-Scale Floods Based on GPU Parallel Computing. *Water*, 10(5), 589. <https://doi.org/10.3390/w10050589>
39. Xia, Y., Luo, L., Luo, H., Lou, J., Edwards, J. R., & Mueller, F. (2014). On the Multi-GPU Computing of a Reconstructed Discontinuous Galerkin Method for Compressible Flows on 3D Hybrid Grids. *7th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2014-3081>
40. Xue, W., Jackson, C. W., & Roy, C. J. (2018). Multi-CPU/GPU parallelization, optimization and machine learning based autotuning of structured grid CFD codes. *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*. <https://doi.org/10.2514/6.2018-0362>
41. Zia A., Banihashemi M.A. (2008). Simple efficient algorithm (SEA) for shallow water flows with shock wave on dry and irregular beds. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 56(11), 2021–2043. <https://doi.org/10.1002/flid.1585>
42. Begnudelli L., Sanders B.F. (2006). Unstructured grid finite-volume algorithm for shallow-water flow and scalar transport with wetting and drying. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(4), 371-384. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:4\(371\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:4(371))
43. Toro, E.F., Spruce, M. & Speares, W. (1994). Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver. *Shock Waves*, 4(1), 25–34. <https://doi.org/10.1007/BF01414629>

44. Roe P.L. (1981). Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes. *Journal of Computational Physics*, 43(2), 357-372. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90128-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90128-5)
45. Karypis G., Kumar V. METIS: A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes, and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices, Version 4.0. *Technical Report*, Dept. of Computer Science and Eng. University of Minnesota, Minneapolis, MN. 1998.
46. Amdahl, G. M. (1967). Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large-Scale Computing Capabilities. *AFIPS Conference Proceedings*, 30, 483-485. <https://doi.org/10.1145/1465482.1465560>
47. Synolakis C.E., Bernard E.N., Titov V.V., Kânoğlu U., and González F.I. (2007). Standards, criteria, and procedures for NOAA evaluation of tsunami numerical models. *NOAA Tech. Memo. OAR PMEL-135*, NOAA/PMEL, Seattle, WA, 2007, 55 pp.
48. Amante, C., Eakins, B. W. (2009). Etopo1 1 arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*, March 2009, 19 pp.
49. Jarvis A., Reuter, H. I., Nelson, A., and Guevara, E.: Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture. <http://srtm.csi.cgiar.org>
50. Muhari, A., Imamura, F., Suppasri, A., & Mas, E. (2012). Tsunami arrival time characteristics of the 2011 East Japan Tsunami obtained from eyewitness accounts, evidence and numerical simulation. *Journal of Natural Disaster Science*, 34(1), 91-104. <https://doi.org/10.2328/jnds.34.91>
51. Japan Meteorological Agency, Tsunami observation data at Soma. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/13a/201104131600.html>
52. Japan Society of Geoinformatics, Inundation Areas of 2011 Tsunami in East Japan. <http://www.jsgj-map.org/tsunami/>

The article was received 22.03.2023 and was accepted after revision 09.06.2023

Сорокін Максим Вікторович

науковий співробітник

Інститут проблем математичних машин і систем НАН України

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

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

UDC 519.6:544.431.11: 544.016.5-022.53

Gela Kipiani, PhD, Professor

e-mail: gelakip@gmail.com

Elina Kristesiashvili, PhD, Professor

e-mail: e.kristesiashvili@gtu.ge

Anna Tabatadze, PhD, Associate Professor

e-mail: a.tabatadze@gtu.ge

Zaza Jangidze, PhD student

e-mail: jangidzezaza@gmail.com

Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia

STUDY OF NON-LINEAR OSCILLATIONS OF THE HIGH-RISE BUILDINGS

Annotation. *Seismic calculations are based on the hypothesis that maximum seismic horizontal displacements of inelastic systems are equal to displacements of elastic systems of equivalent frequencies.*

Analysis of strong earthquakes of recent years (San Francisco, USA, 1971, Spitak, Armenia, 1988, Kobe, Japan, 1995 and others) led scientists to the conclusion that this hypothesis cannot be recognized as acceptable. In a number of cases, the maximum horizontal displacements turned out to be 2–3 orders of magnitude higher than the maximum displacements of elastic systems. For example, a displacement graph based on the 1985 Mexico City earthquake shows that the actual plastic displacements are 100 times the expected plastic displacements. In the case of other earthquakes, there are hundreds of subtle inconsistencies. The quantitative results concluded that the intensity of building vibrations exceeded 1.5 times the 9-point design seismic intensity ± 2.5 and that a special approach, including the need to consider impact effects, is needed and is particularly serious in such zones. This should also be taken into account. Inelastic deformations are indicated. The new calculation is used to study non-linear oscillations caused by impulsive actions of a continuous system. In the case of elastic vibration, changing the mass gives very different results. Reducing the lower mass by a factor of 3 reduces the displacement by a factor of ≈ 2.2 for the upper mass and ≈ 2.4 for the second mass. The same impact was applied to a 16-story building and the stiffness distribution of the rods was studied in different ways. The stiffness was constant everywhere, constant within 4 stories, where it varied linearly and parabolically with height. Displacements during the course of the pulse shock were greater in the stiffer buildings. Furthermore, the vibration decreases in amplitude by a factor of 3 or more for the upper mass and by a factor of 4 for the lower mass. The force on the upper rod is reduced by a factor of 4 and the force on the lower rod is reduced by a factor of 6. This will make it possible to perform calculations for a small time scale, which is necessary to take into account high-frequency oscillations that occur in the epicentric zone.

Keywords: *building; seismic; epicenter zone; impact depends; discrete-continual system.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.194-202>

Introduction

It is known that the nature of seismic impact depends on the distance from the epicenter zone. Ground displacements are of pulsed nature in the direct vicinity of the epicenter zone [1, 2]. Provide analysis of both, the case of impacting the building located directly at the fissure area and the records of locations near the joint fissure: Taiwan, Kobe, Loma Prieta, Northridge and Whittier (USA).

On the basis of the analysis the conclusion was made that in quantitative respect, intensity of the building oscillation exceeds 1.5÷2.5 times the intensity provided 9-point design seismicity pointing to the fact that in such zones construction requires special approach, including necessity of taking into consideration of the shock effect and this is particularly severe in such zones.

It should also be taken into consideration that the recommendations for design of the high-rise buildings emphasize necessity of calculation of non-elastic deformations and their restriction.

Thus, the issue is provision for non-elastic work of the building structures caused by shock effect in the high-rise buildings.

Work provides consideration of the issue of study of non-linear oscillations of the carcass building as discrete-continual system, where the building is exposed to the pulsed displacement of the ground and the rods binding the localized masses work only for shift, according to Prandtl scheme.

Study area and methods

Let us consider oscillation of several masses resulting from horizontal pulse YF shift of the ground (Fig. 1).

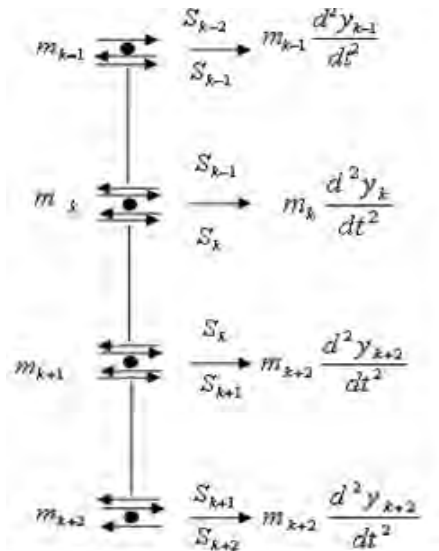


Fig. 1

At the same time, let us assume that S force is applied to the center of gravity of the mass. Hence, movement of the mass is conditioned by S force only, being the counteraction of the rod, which, depending on the condition of the rod (elastic or plastic), could depend on linear displacement of the rod end (in case of elastic

condition) or any unknown relationship (in case of plastic condition) $S = F(y)$. Let us divide oscillation time into small Δt sections and assume that S is constant in each section, i.e. $S = \sum S_i$ [3, 4]. Let us take any m_k mass. Differential equation of its movement will be:

$$m_k \frac{d^2 y_k}{dt^2} + S_{k-1} - S_k = 0 .$$

If we present each of the forces in a form of sum:

$$S_k = \sum_{i=1}^{I-1} S_{k,i} ,$$

and integrate with zero initial conditions, we shall obtain:

$$y_k = - \sum_{i=1}^I \frac{(t_I - t_{j-1})^2}{2m_k} S_{k-1,i} + \sum_{i=1}^I \frac{(t_I - t_{j-1})^2}{2m_k} S_{k,i} .$$

As we have noted earlier, the rod works only in case of shift and therefore, elastic displacement of its end, taking into consideration the shear deformation, will be $\frac{Sl}{GF}$, where G is the displacement modulus and F – rod crosssection. It is clear that in the oscillation process, where S achieves its limiting value S_L (Fig. 1), the rod end will have maximal elastic displacement $\frac{S_L l}{GF}$ and some more plastic displacement Δ_{Pl} .

Condition of continuity between m_k and m_{k+1} masses, for the first section Δt , could be recorded as follows:

$$- S_{k-1,1} \frac{\Delta t^2}{2m_k} + \left(\frac{\Delta t^2}{2m_k} + \frac{\Delta t^2}{2m_{k+1}} + \frac{l}{GF} \right) S_{k,1} - S_{k+1,1} \frac{\Delta t^2}{2m_{k+1}} = 0 .$$

For the second step:

$$\begin{aligned} & - S_{k-1,2} \frac{\Delta t^2}{2m_k} - S_{k-1,1} \frac{(2\Delta t)^2}{2m_k} + \left(\frac{\Delta t^2}{2m_k} + \frac{\Delta t^2}{2m_{k+1}} + \frac{l}{GF} \right) S_{k,2} + \left[\frac{(2\Delta t)^2}{2m_k} + \frac{(2\Delta t)^2}{2m_{k+1}} + \frac{l}{GF} \right] S_{k,1} - \\ & - S_{k+1,2} \frac{\Delta t^2}{2m_{k+1}} - S_{k+1,1} \frac{(2\Delta t)^2}{2m_{k+1}} = 0 \end{aligned}$$

For any I step:

$$\begin{aligned} & - S_{k-1,I} \frac{\Delta t^2}{2m_k} - \sum_{i=1}^{I-1} S_{k-1,i} \frac{(t_I - t_{i-1})^2}{2m_k} + S_{k,I} \left[\Delta t^2 \left(\frac{1}{2m_k} + \frac{1}{2m_{k+1}} \right) + \frac{l}{GF} \right] + \\ & + \sum_{i=1}^{I-1} S_{k,i} \left[(t_I - t_{i-1})^2 \left(\frac{1}{2m_k} + \frac{1}{2m_{k+1}} \right) + \frac{l}{GF} \right] - S_{k+1,I} \frac{\Delta t^2}{2m_{k+1}} - \sum_{i=1}^{I-1} S_{k+1,i} \frac{(t_I - t_{i-1})^2}{2m_{k+1}} = 0 \end{aligned}$$

This expression is valid if the rod is elastic but if it is in the plastic condition, the following component will be added:

$$\Delta_{k,Pl} = \Delta_{k,I} + \sum_{i=1}^{I-1} \Delta_{k,i} .$$

If we add and move to the left side only the components containing $S_{k,I}$ and $\Delta_{k,I}$, we obtain:

$$S_{k,I} \left[\Delta t^2 \left(\frac{1}{2m_k} + \frac{1}{2m_{k+1}} \right) + \frac{l}{GF} \right] + \Delta_{k,I} = \sum_{i=1}^I S_{k-1,I} \frac{(t_I - t_{i-1})^2}{2m_k} - \\ - \sum_{i=1}^{I-1} S_{k,I} \left[(t_I - t_{i-1})^2 \left(\frac{1}{2m_k} + \frac{1}{2m_{k+1}} \right) + \frac{l}{GF} \right] + \sum_{i=1}^{I-1} S_{k+1,i} \frac{(t_I - t_{i-1})^2}{2m_{k+1}} - \sum_{i=1}^{I-1} \Delta_{k,i} .$$

Taking the following designations into consideration:

$$tl_1(n) = \frac{(n \times \Delta t)^2}{2m_1} + \frac{(n \times \Delta t)^2}{2m_2} + \frac{l_1}{GF}, \quad tl_2(n) = \frac{(n\Delta t)^2}{2m_2} + \frac{l}{GF},$$

$$Dlm(n) = tm_2(n) \cdot S_{21} + tm_2(n-1)S_{22} + \dots + tm_2(2)S_{2,n-1} - tl_1(n)S_{11} - tl_1(n-1)S_{12} - \dots - tl_1(2)S_{1,n-1}$$

$$Tlm(n) = YF(n) + tm_2(n)S_{11} + tm_2(n-1)S_{12} + \dots + tm_2(2)S_{1,n-1} - tl_2(n)S_{21} - tl_2(n-1)S_{22} - \dots - tl_2(2)S_{2,n-1}$$

$$tm_2(n) = \frac{(n\Delta t)^2}{2m_2}, \quad tm_1(n) = \frac{(n\Delta t)^2}{2m_1}, \quad FL=l/GF .$$

We shall have:

$$S_{k,I} [tm_k(1) + tm_{k+1}(1) + FL] + \Delta_{k,I} = S_{k-1,1}tm_k(I) + S_{k-1,2}tm_k(I-1) + \dots + S_{k-1,I}tm_k(1) - \\ - S_{k,1} [tm_k(I) + tm_{k+1}(I) + FL] - S_{k,2} [tm_k(I-1) + tm_{k+1}(I-1) + FL] - \dots - \\ - S_{k,I-1} [tm_k(2) + tm_{k+1}(2) + FL] + S_{k+1,1}tm_k(I) + S_{k+1,2}tm_{k+1}(I-1) + \dots + \\ + S_{k+1,I}tm_{k+1}(1) - \sum_{i=1}^{I-1} \Delta_{k,i}$$

Equation recorded for the lower rod will contain additionally the ground displacement YF .

Obtained system of equations could be solved by the method of sequential approximations. For each DT interval, in the right side, we give some (zero) values to the values subject to calculation and compare with the values of previous approximation, when the difference falls below the required accuracy, we move to the following time interval. At the same time, for each interval, each rod there is checked whether the obtained force exceeds its limiting value. If it exceeds, than the

force increment is assumed to be zero and instead, the plastic displacement is calculated by means of the above formulas.

Calculation results

Calculations were made to study non-linear oscillations of the structures where as the bearing structures of the building, at each level, the metal piles located with 6 m intervals are used in both directions [6–10]. The piles are made of two N20A channel bars, covered with 20x20 m reinforced concrete slab of 16 cm thickness. Height of the piles is 4 m, displacement yield point $\tau_s = 1600 \text{ kg/cm}^2$, aggregate crosssection of the channel bars is 800 cm^2 , and weight of the reinforced concrete slab is 15.000 kg. As a result of the earthquake the base of the building is subject to pulsed displacement $W = ate^{-\beta t}$, where a is initial velocity and $\frac{1}{\beta}$ time, when displacement is maximum.

Calculations are made for two-, five- and sixteen-storey buildings.

In case of two-storey buildings, the effect of change of the masses on the values of elastic and plastic displacement, as well as the values of the caused forces is studied (Fig. 2, 3).

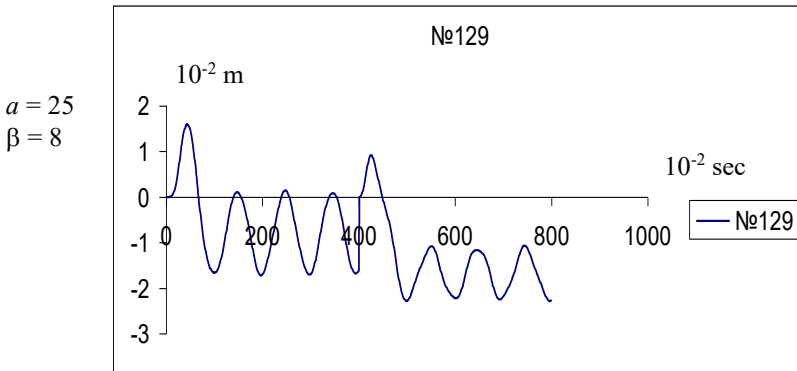


Fig. 2. Displacements of the elastic-plastic system

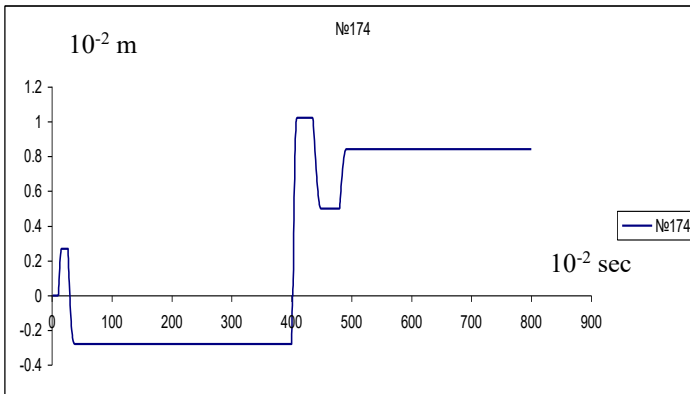


Fig. 3. Plastic displacements

In case of five-storey building, effect of the repeated pulse is studied (Fig. 4, 5).

In case of sixteen-storey building, effect of change of the stiffness with height on the elastic-plastic displacements and force values is studied (Fig. 6 and 7).

Fig. 6 shows the building with the constant stiffness for whole height, while Fig. 7 shows the one with the stiffnesses constant within four storeys, decreasing from bottom to top. Note, that in case of two-mass system, the oscillations of the upper mass commences on the abscissa, point 0, while lower mass – from the point 400. Drawings for five and sixteen points were developed in the similar way.

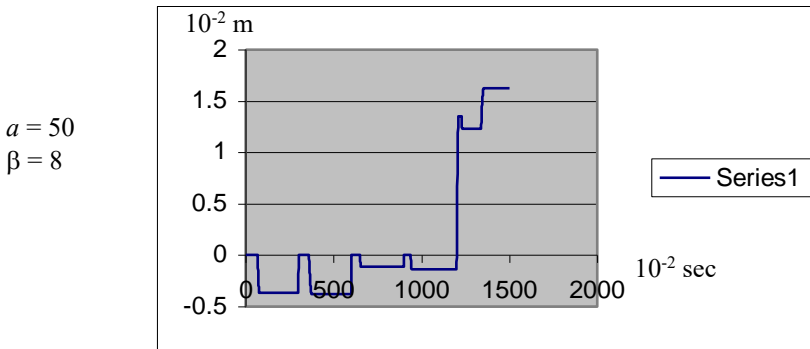


Fig. 4. Plastic displacements in case of five storeys

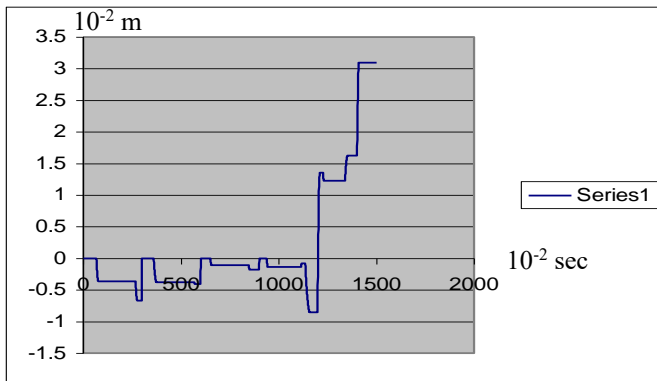


Fig. 5. Plastic displacements for repeated pulse

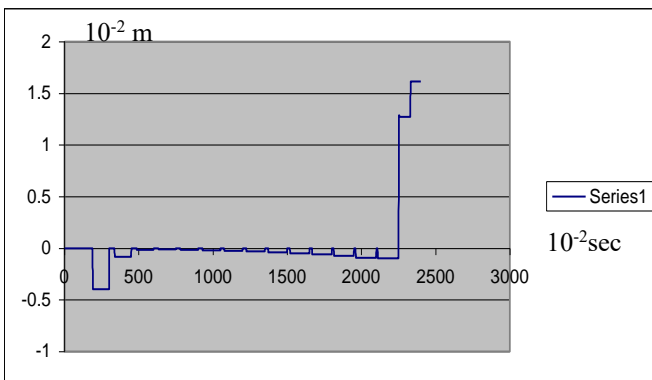


Fig. 6. Plastic displacements for constant system

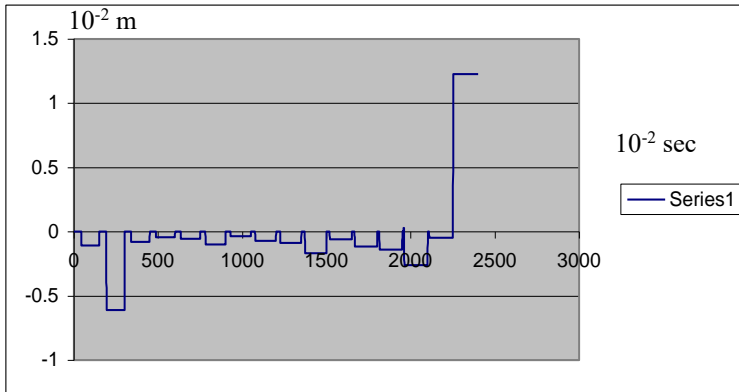


Fig. 7. Plastic systems for variable system

Conclusions

1. In case of pulse impact, the displacements of the elastic-plastic system are smaller than the ones of elastic oscillations (where there is no plastic section) [5].

2. In case of elastic-plastic system, after completion of the impact oscillation takes place in relation to the residual plastic displacement.

3. In case of pulse impact one and the same acceleration may be caused by different velocities and values of displacement and force correspond to them. Hence, in the area adjacent to the joint fissure, where the impact is of pulsed nature and it would be reasonable to take velocity for seismic zoning, rather than acceleration.

4. In case of the repeated shock, depending on the moment of oscillation when the repeated shock takes place, the results will be different. Given physical laws, applicable to the material, the force cannot exceed the limiting value, while it can decrease significantly. In case of unrestricted displacement they can increase significantly.

5. In case of two-mass system, decrease of the lower mass three times caused insignificant change of displacement of the upper mass, while it reduced plastic displacement almost three times, where oscillations continue. Displacement of the lower mass increased by $\approx 30\%$ and plastic displacement reduced almost two times. In case of reduction of the upper mass three times the displacement increases almost three times for both masses.

In case of elastic oscillations, change of the masses provides substantially different results. Decrease of lower mass three times causes reduction of displacement ≈ 2.2 times for the upper mass and ≈ 2.4 for the second mass. Further oscillation is with the amplitude decreased three and more times for the upper mass, while for the lower mass, amplitude decreases 4 times. Forces in the upper rod decrease 4 times, while in the lower one – 6 times.

Decrease of the upper mass three times, at a time of pulse impact, the maximal amplitude decreases three times for the upper mass and 2 times – for the lower mass. Further oscillation takes place with the four times decreased amplitude for the first mass and five times decreased amplitude for the second one. Force in the upper rod decreases approximately two times and four times in the lower one.

6. In case of five-storey building, where $\alpha = 50$ and $\beta = 8$, in all five rods there are plastic displacements. Maximal displacement is in the lower rod (1.62 cm), in two upper ones – much lower (0.37 cm) and even lower in the third and fourth rods (0.11 and 0.14 cm). Maximal displacements in three lower rods are almost equal (2.3 cm) and slightly lower in the upper two rods (1.9 and 1.8 cm).

Comparison of these values with the elastic oscillations provides dramatically different results. Maximal displacements are in two upper rods and they are two times greater than for the elastic-plastic displacements.

7. Repeated pulse impact is much more significant for the elastic oscillations, compared with the elastic-plastic ones.

8. Sixteen-storey building was studied for the same impact, with different stiffness distributions of the rods. Where stiffness is constant everywhere, constant within four storeys and changes with height linearly and parabolically. Displacement in the process of pulse impact process was greater in the buildings with higher stiffness.

REFERENCES

1. Official Publication of the European Association of Earthquake Engineering. (2008). Bulletin of Earthquake Engineering. November 2008, V6 N4.
2. Itskov, I.E. (2004). Instrumental Data on Parameters of the Earth Surface Movement in the Epicenter Zones of Powerful Earthquakes. Seismic Construction. *Safety of Structures*, 3, 49-55.
3. Gabrichidze, G. K. (1991). Some Non-traditional Problems of Interrelations between Engineering Structures with the Rheological Environment. Dissertation work [in Georgian].
4. Gabrichidze, G., Giorgadze D., Chkhikvadze, K., & Chlaidze N. (2008). Delay-algorithm to study linear and nonlinear motion of the constrained particles system. In *First inter. confer. of seismic safety*. Tbilisi [in Georgian].
5. Modkar, D.P., & Povel, G.H. (1977). Finite element analysis of non-linear static and dynamic response. *Int. J. for Numerical methods in eng.*, 11, 499-520.
6. 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. <https://doi.org/10.1109/CADSM52681.2021.9385211>
7. 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*, (pp. 1-5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580086>
8. Kaliukh, I., & Berchun, Y. (2020). Four-Mode Model of Dynamics of Distributed Systems. *J. of Automation and Information Sciences*, 52 (2), 1–12.
9. 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
10. 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>

The article was received 08.03.2023 and was accepted after revision 31.05.2023

Гела Кіпіані, Еліна Крістесіашвілі, Анна Табатадзе, Заза Джангідзе
ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАНЬ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ

Анотація. Сейсмічні розрахунки базуються на гіпотезі про те, що максимальні сейсмічні горизонтальні переміщення непружних систем дорівнюють переміщенням пружних систем з еквівалентною частотою. Аналіз сильних землетрусів останніх років (Сан-Франциско, США, 1971 р., Спітак, Вірменія, 1988 р., Кобе, Японія, 1995 р. та інші) привів вчених до висновку, що цю гіпотезу не можна визнати прийнятною. У ряді випадків максимальні горизонтальні переміщення виявлялися на 2–3 порядки вищими за максимальні переміщення пружних систем. Наприклад, графік переміщення, заснований на землетрусі в Мехіко 1985 року, показує, що фактичні пластичні зміщення в 100 разів перевищують прогнозовані пластичні зміщення. У випадку інших землетрусів також присутні сотні невідповідностей. За кількісними результатами статті було зроблено висновок, що інтенсивність коливань будівлі в 1,5 раза перевищила 9-бальну проектну сейсмічну інтенсивність ± 2.5 і що в таких випадках потрібен особливий підхід до прогнозування, що включає необхідність врахування ударних впливів. На це також треба звернути увагу. Були враховані непружні деформації. Новий розрахунок використовується для дослідження нелінійних коливань, викликаних імпульсними діями безперервної дії. У випадку пружних коливань зміна маси дає зовсім інші результати. Зменшення нижньої маси загалом в 3 рази зменшує переміщення (в 2,2 – для верхньої будови і 2,4 – для нижньої будови, відповідно). Такий самий вплив було застосовано до 16-поверхового будинку, де розподіл жорсткості стрижнів було досліджено різними способами. Жорсткість була постійною всюди в межах перших 4 поверхів, а далі вона змінювалася лінійно та параболічно з висотою. Зміщення під час імпульсного удару були більшими в більш жорстких будівлях. Крім того, амплітуда вібрації зменшується в 3 або більше разів для верхньої будови та в 4 рази для нижньої будови. Зусилля на верхньому стрижні зменшується в 4 рази, а на нижньому стрижні – в 6 разів. Це дає можливість виконувати розрахунки для малого масштабу часу, який необхідний для врахування високих частот коливань, що виникають в зоні епіцентру землетрусу.

Ключові слова: будівля; сейсміка; зона епіцентру землетрусу; залежність від дії; дискретно-континуальна система.

Стаття надійшла до редакції 08.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 31.05.2023

Гела Кіпіані

кандидат технічних наук, професор, Грузинський технічний університет
Адреса робоча: вул. Костава 68, Тбілісі, 0186, Грузія
e-mail: gelakip@gmail.com

Еліна Крістесіашвілі

кандидат технічних наук, професор, Грузинський технічний університет
Адреса робоча: вул. Костава 68, Тбілісі, 0186, Грузія
e-mail: e.kristesiashvili@gtu.ge

Анна Табатадзе

кандидат технічних наук, доцент, Грузинський технічний університет
Адреса робоча: вул. Костава 68, Тбілісі, 0186, Грузія
e-mail: a.tabatadze@gtu.ge

Заза Джангідзе

аспірант, Грузинський технічний університет
Адреса робоча: вул. Костава 68, Тбілісі, 0186, Грузія
e-mail: jangidzeza@gmail.com

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copying © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. All rights reserved.

ДО УВАГИ АВТОРІВ ЗБІРНИКА

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню збірника.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова (не менше п'яти) двома мовами (українською та англійською).

Підготовка статті здійснюється в текстовому редакторі MS WORD for WINDOWS, з використанням шрифту Times New Roman, Суг, кегль 11, одинарний інтервал, полями 2,0 см з кожного боку, заданим розміром сторінок 17x26 см.

Усі формули мають бути набрані в редакторі MathType.

Ілюстрації повинні обов'язково нумеруватися, мати книжкову орієнтацію і не можуть перевищувати за розміром задану сторінку (параметри сторінки 17x26 см з полями 2,0 см). Перелік літературних джерел перекладається англійською мовою (або транслітерується в романському алфавіті) і подається відповідно до міжнародного стандарту оформлення наукових публікацій **APA (American Psychological Association) style** загальним списком у кінці статті за чергою посилань у тексті.

Наприкінці статті наводиться коротка довідка про авторів, де вказуються прізвище, повне ім'я та по батькові авторів, науковий ступінь, вчене звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, особисті дані кожного з авторів (адреса, місто, країна, контактний телефон, e-mail), ORCID ID.

Обов'язково слід надати електронну версію статті в редакторі Microsoft Word.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами збірника, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ збірника, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником. Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія збірника.

Електронна версія збірника, правила оформлення та вимоги до статей містяться в Інтернеті на сайті <http://www.es-journal.in.ua>, який систематично оновлюється.

Збірник наукових праць також представлений на сайті Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України <http://itgip.org/> у розділі «Видавнича діяльність» та на сайті бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури <http://library.knuba.edu.ua/node/883>.

Редактор – В.П. Берчун

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36а.
Тел.: (044) 360-22-66
www.yuston.com.ua

**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 28.06.23 Формат 70x108/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 17.85
Обл.-вид. арк. 13.54 Тираж 300 примірників
Замовлення № _____

КИЇВ 2023