

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет  
будівництва і архітектури

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут телекомунікацій  
і глобального інформаційного простору

# Екологічна безпека та природокористування

---

Environmental safety and natural resources

Збірник наукових праць

ВИПУСК 42

2022

**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 (42), квітень-червень 2022 р.

Заснований у 2008 р.  
Виходить 4 рази на рік

---

**Academic journal**

Issue 2 (42), April-June 2022

Founded in 2008  
The journal is published 4 volume a year

**КИЇВ 2022**

---

**KYIV 2022**

## 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

## ВИКОНАВЧИЙ РЕДАКТОР

**Ю.І. КАЛЮХ**, д-р техн. наук, проф.

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

**Г.М. КОЧЕТОВ**, д-р техн. наук, проф.

**Т.І. КРИВОМАЗ**, д-р техн. наук, проф.

**О.М. ТЕРЕНТЬЄВ**, д-р техн. наук

**О.М. ТИХЕНКО**, д-р техн. наук, проф.

**В.М. ТРИСНЮК**, д-р техн. наук

## МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА

**М.-Й. ВАЛЕРІ**, проф., Польща

**Д. МІНТЕР**, проф., Великобританія

**А. МІШО**, дослідник, Франція

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

**Я. ПЕКУТІН**, проф., Польща

**ПІНГ ЛУ**, проф., Китай

---

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Київського національного університету будівництва і архітектури  
(протокол № 51 від 27.06.22)

Збірник наукових праць включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія "Б"), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук за напрямом «технічні науки» (Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886)

## ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА

- Екологічна безпека та основи природокористування
- Цивільна безпека
- Інформаційні ресурси 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

**Адаменко О.М.**

Періодичність розвитку Землі для прогнозування наступних проявів катастрофічних паводків..... 5

**Чумаченко С.М., Яковлев Є.О., Пиріков О.В., Парталян А.С.**

Особливості реалізації мережі екологічного моніторингу бойових дій для Збройних Сил України..... 23

**Триснюк В.М., Шумейко В.О., Триснюк Т.В., Марущак В.М.**

Моніторинг радіоактивного забруднення місцевості та ліквідації наслідків природних та техногенних катастроф..... 35

### ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

**Здановський В.Г., Глива В.А., Бурдейна Н.Б.**

Основні задачі імплементації міжнародних нормативів з охорони праці у правове поле України..... 47

**Khodnevyh Ya.V., Stefanyshyn D.V.**

Data arrangements to train an artificial neural network within solving the tasks for calculating the Chézy roughness coefficient under uncertainty of parameters determining the hydraulic resistance to flow in river channels..... 59

### ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

**Герасимов О.І., Сідлецька Л.М.**

Гідростатичний тиск в гранульованому середовищі..... 86

**Селезов І.Т., Воскобійник В.А., Воскобойник О.А., Харченко А.Г.,  
Воскобійник А.В.**

Взаємодія гравітаційних хвиль з проникним хвилеломом..... 96

**Adamenko O.M., Zorin D.O., Radlowska K.O.**

Forecasting of disaster floods in Dniester valley..... 112

**ДО ВІДОМА АВТОРІВ..... 121**

## CONTENTS

### ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

**Adamenko O.**

Periodicity of Earth development for forecasting the next manifestations of disaster floods..... 5

**Chumachenko S.M., Yakovliev Ye.O., Pyrykov O.V., Partalyan A.S.**

Peculiarities of implementation of the network of ecological monitoring of combat action for the Armed Forces of Ukraine..... 23

**Trysnyuk V.M., Shumeyko V.O., Trysnyuk T.V., Marushchak V.M.**

Monitoring of radioactive pollution of the site and elimination of the consequences of natural and technogenic disasters..... 35

### CIVIL SAFETY

**Zdanovsky V., Glyva V., Burdeina N.**

Main tasks of implementation of international labor protection regulations in the legal field of Ukraine..... 47

**Khodnevykh Ya.V., Stefanyshyn D.V.**

Data arrangements to train an artificial neural network within solving the tasks for calculating the Chézy roughness coefficient under uncertainty of parameters determining the hydraulic resistance to flow in river channels..... 59

### INFORMATION RESOURCES AND MATHEMATICAL MODELING

**Gerasymov O.I., Sidletska L.M.**

Hydrostatic pressure in granular environment..... 86

**Selezov I.T., Voskoboinick V.A., Voskoboinyk O.A., Kharchenko A.G., Voskoboinick A.V.**

Interaction of gravitational waves with permeable breakwater..... 96

**Adamenko O.M., Zorin D.O., Radlowska K.O.**

Forecasting of disaster floods in Dniester valley..... 112

**INFORMATION FOR AUTHORS**..... 121

# ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

УДК 556.552(477-924-52)

**Oleg Adamenko**, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Professor of Ecology

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0821-3011> **e-mail:** yarad1964@gmail.com

Forecasting and Warning Center technogenic and hydroecological danger of Prykarpattia Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

## PERIODICITY OF EARTH DEVELOPMENT FOR FORECASTING THE NEXT MANIFESTATIONS OF DISASTER FLOODS

**Abstract.** *Catastrophic floods on the rivers of the Western region of Ukraine occur with a frequency of 6–12–19 years. The last two floods of 2008 and 2020 caused significant damage to landscapes, economic infrastructure, and the population. In 2008 and 2020 alone, more than 20,000 houses were destroyed in 420 settlements in Ivano-Frankivsk, Lviv, Chernivtsi, Ternopil, Zakarpattia and Vinnytsia regions. More than 300 km of roads, 600 km of fortifications and 350 bridges were washed away. In 2008, 19 people died, including 5 children. Similar floods occurred in 1911, 1927, 1941, 1955, 1969, 1980, 1988. Therefore, it is important to study the causes of floods, the possibility of forecasting and warning to prevent and overcome the devastating effects. Therefore, on January 1, 2021, a separate structural subdivision was created at the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (IFNTUOG) – the Center for Forecasting and Prevention of Technogenic and Hydroecological Danger of Prykarpattia (CFPTHDP). Materials and research methods were developed even earlier, since 2008, at the Dniester Engineering-Ecological Research-Training-Production Anti-Flood Landfill IFNTUOG by the staff of the Department of Ecology under the guidance of the author of the article. This is a systematic analysis of geological structure, geophysical fields, geomorphological and paleographic features, taking into account the data of archeology, dendrochronology, chronicle, historical and instrumental epochs of observations for 1881–2020. Forecasting, ie what area will be covered by the flood; prediction of its activity, ie at what maximum height the water will rise; and the weather forecast – when it will happen. The first two parts of the triad are predicted with a probability of 75–80%, but the third – so far, only 50%.*

**Key words:** *flood; flooding; landfill; periodicity; forecast triad*

О.М. Адаменко

Центр прогнозування та попередження техногенно-гідроекологічної небезпеки Прикарпаття Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

## ПЕРІОДИЧНІСТЬ РОЗВИТКУ ЗЕМЛІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НАСТУПНИХ ПРОЯВІВ КАТАСТРОФІЧНИХ ПАВОДКІВ

***Анотація.** Катастрофічні паводки на річках Західного регіону України відбуваються з періодичністю 6–12–19 років. Останні два паводки 2008 і 2020 рр. завдали значних руйнувань ландшафтам, господарській інфраструктурі, населенню. Тільки у 2008 і 2020 рр. було зруйновано більше 20 000 будинків, у 420 населених пунктах Івано-Франківської, Львівської, Чернівецької, Тернопільської, Закарпатської та Вінницької областей. Було розмито більше 300 км автомобільних доріг, 600 км берегоукріплень, 350 мостів. У 2008 р. загинуло 19 осіб, в тому числі 5 дітей. Подібні паводки відбувались у 1911, 1927, 1941, 1955, 1969, 1980, 1988 рр. Тому важливим є вивчення причин водопіль, можливості прогнозування і попередження для запобігання і подолання руйнівних наслідків. Тому 1.01.2021 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (ІФНТУНГ) був створений окремий структурний підрозділ – Центр прогнозування та попередження техногенно-гідроекологічної небезпеки Прикарпаття (ЦППТГНП). Матеріали і методи досліджень розроблялись ще раніше, з 2008 р., на Дністровському інженерно-екологічному науково-навчально-виробничому протипаводковому полігоні ІФНТУНГ співробітниками кафедри екології під керівництвом автора статті. Це системний аналіз геологічної будови, геофізичних полів, геоморфологічних та палеогеографічних особливостей з врахуванням даних археології, дендрохронології, літописної, історичної та інструментальної епох спостережень за 1881–2020 рр. В результаті досліджень проблема прогнозування катастрофічних паводків розглядається як єдність трьох складових (тріада): територіального прогнозування, тобто яку площу охопить паводок; передбачення його активності, тобто на яку максимальну висоту підніметься вода; і часовий прогноз – коли це відбудеться. Перші дві частини тріади прогнозуються з ймовірністю 75–80%, а ось третя – поки що, тільки 50%.*

***Ключові слова:** повінь; паводок; полігон; періодичність; тріада прогнозу*

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.5-22>

### Постановка проблеми

Досліджено, що часовий прогноз складається з 13 синусоїд різного порядку – від I порядку – 240 млн р. космічної періодичності галактичного року, через 175, 165, 41 і 14 млн р. геологічної періодичності II, III, IV і V порядків, 45 і 10 млн р. геоморфологічної періодичності IV і V порядків, 9 тис. р. палеогеографічної періодичності VI порядку, 1830, 800 р. дендрохронологічної періодичності та епох зволоження А. В. Шнітнікова – VIII порядок, 650, 600 р. періодичності пізнього плейстоцену та голоцену VIII і IX порядків, 500 р. археологічної періодизації X порядку, 300 р. періодичності розвитку цивілізацій XI порядку, 33 р. літописної періодичності XII порядку до  $11 \pm 1$  р. періодичності сучасного потепління XIII порядку. Інтегруючи синусоїди усіх 13 порядків у підсумковій

періодичності, отримуємо найбільшу ймовірність прояву небезпечних водних стихій. Підкреслено, що неважливо, коли це відбудеться, через 6–12–19 років, важливо, що воно обов'язково відбудеться і до цього потрібно бути готовим.

У Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (ІФНТУНГ) 1 січня 2021 р. був створений окремий підрозділ – Центр прогнозування та попередження техногенно-гідроекологічної небезпеки Прикарпаття (ЦПТГНП) для передбачення та подолання наслідків катастрофічних паводків. Тільки за останні роки таких водопіль було два: у 2008 та 2020 рр. Останній був прогнозований ще у 2014 р. автором [7] на основі історико-геологічної, геоморфологічної, палеогеографічної, археологічної, літописної та інструментальної періодичності небезпечних гідроекологічних та інших екстремальних процесів. Саме для розвитку цього напрямку Наук про Землю, екології, археології, кліматології і був створений ЦПТГНП.

Накопичена природознавча інформація дозволила автору виділити проблеми періодичності розвитку Землі як об'єкта Всесвіту, нашої галактики Чумацького шляху, Сонячної системи як субстрату, на якому з'явилося і розвивається життя, і на якому людство впливає на його збереження. Це вилилось у розробку системи періодичності розвитку Землі.

Чому періодичність, а не періодизація? Тому що це – природні, а не штучно виділені відтинки розвитку нашої планети і всього, що на ній утворилось.

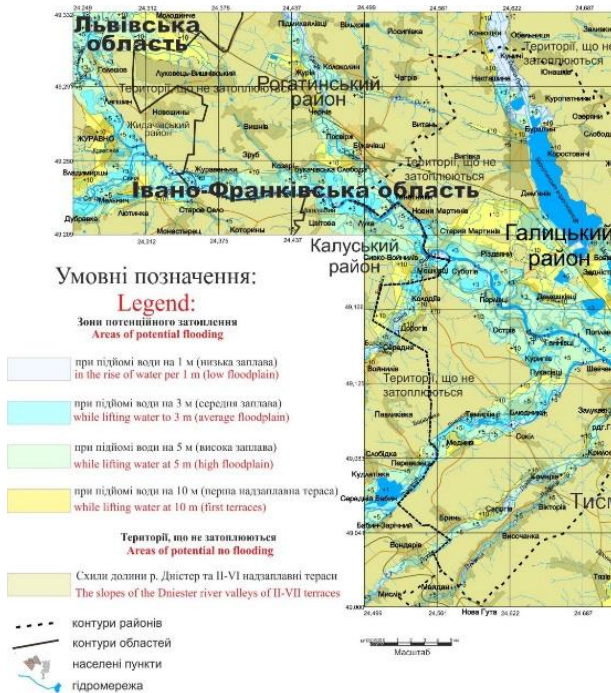


Рис. 1. Територіальний прогноз – карта екологічного ризику затоплення територій катастрофічними паводками

Наші ідеї про періодичність розвитку Землі народились давно, ще у період роботи над докторською дисертацією в 70-ті роки минулого століття. Вони розвивались завдяки геоморфолого-геотектонічним дослідженням на Сибірській платформі, у Саянах, Монголії, на Алтаї, у Казахстані, Киргизстані, Узбекистані, Таджикистані і Туркменії. Після мого повернення в Україну вони укріпились при вивченні Східно-Європейської платформі та Карпатської гірсько-складчастої системи. Ідеї періодичності розвитку Землі знаходять розуміння та



підтримку з боку керівництва ІФНТУНГ, зокрема ректора академіка НАНУ Євстахія Крижанівського, першого проректора Олега Мандрика та ін. Наші ідеї формувались у гарячих дискусіях на Чорногірському стаціонарі та опорних розрізах антропогену Передкарпаття, Поділля і Полісся, за що ми вдячні колегам Ярославу Кравчуку, Андрію Богуцькому, Миколі Приходьку, Ярославу Адаменку та багатьом іншим [6, 7, 9, 20].

Після катастрофічних паводків 2008 і 2020 рр. виникла необхідність прослідкувати розвиток цих небезпечних явищ в історичному плані, спробувати прогнозувати їх. Проблема прогнозування катастрофічних паводків розглядається нами як триада із трьох частин. Перша – це прогноз територіальний, тобто яку територію охопить наступний паводок (рис. 1), друга – це якої активності досягне небезпечне водопілля, тобто до якої висоти підніметься паводок (рис. 2), і третя – це часовий прогноз, тобто коли це відбудеться. Перші дві частини вже достатньо повно описані нами у попередніх публікаціях [2–5], а третій – часовому прогнозу – присвячена ця стаття.

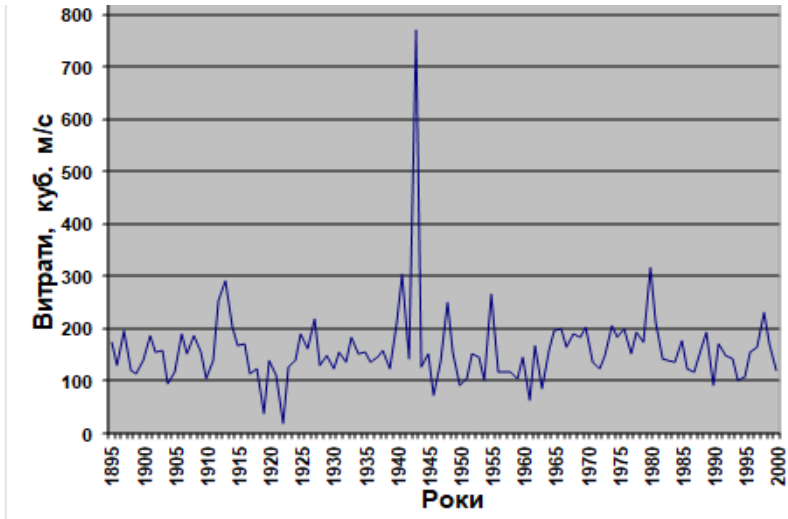


Рис. 2. Середньорічні витрати води ріки Дністер у м. Галич

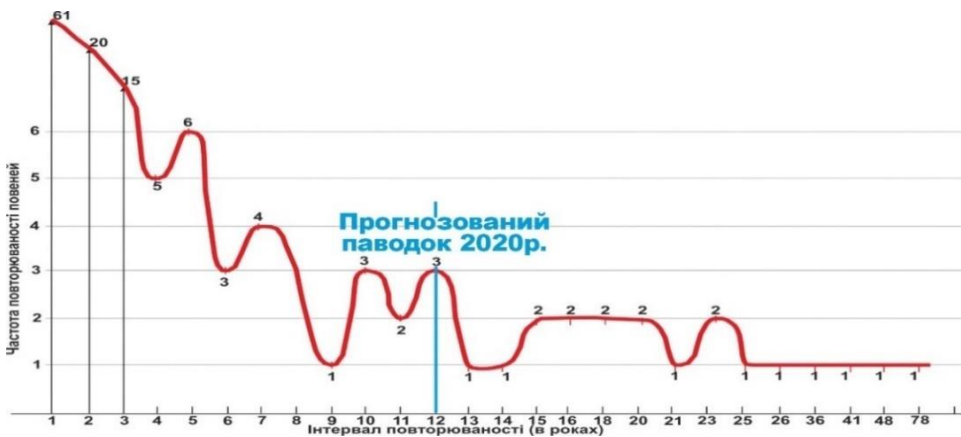


Рис. 3. Часовий прогноз – графік частоти повторюваності катастрофічних паводків через інтервали в 1, 2, 3,...16, 18, 21, 23, 25, 26, 36, 41, 48, 78 років

Отже, актуальність проблеми часового прогнозування без сумніву дуже важлива. Цьому питанню і присвячена наша робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Викладачі кафедри екології ІФНТУНГ виконують науково-дослідні роботи за рахунок своєї основної роботи, що фінансується з державного бюджету України. Це – Бізнес-план ЦППТГНП на 2021 р.: п. 5. Історико-геологічні ретроспективи періодичних проявів паводків у просторі і часі, що передбачено також у Стратегії на 2021–2023 рр. та Положенні про ЦППТГНП.

**Із історії останніх досліджень та публікацій.** Немає сенсу писати чотирирохсотлітню історію досліджень Галичини, долини Дністра, Дністровського каньйону, від Боплана (1650 р.) до незалежної України (1991 р.), тому що про це вже багато написано і автором статті, і багатьма іншими дослідниками [2–5, 7, 10, 13, 15, 16, 18–20]. Віддамо шану численним французьким, австрійським, угорським, словацьким, румунським, польським та українським природознавцям, які дали всесторонню характеристику геології, геоморфології, географії, палеогеографії, а особливо лісовому господарству. Минули польський, радянський етапи досліджень. Основні положення природознавчої галузі перед початком сучасного – українського етапу досліджень опублікували Я. С. Кравчук [9], І. П. Ковальчук [8], А. Б. Богуцький [20], М. Lanczont [27], St. Alexandrowich [19], М. Kotarba [3], О. М. Маринич [11], С. А. Мороз [12], Ж. М. Матвіїшина [10], Д. О. Зорін [6, 7, 18], Г. І. Рудько [15], Я. О. Адаменко [6], В. М. Гуцуляк [3, 7], О. М. Трофимчук [16], Л. М. Архіпова [7], С. Ю. Бортник, В. П. Палієнко, Ф. Д. Гамор та багато-багато інших. Честь їм і хвала!

Але нам для визначення періодичності розвитку Землі необхідні сучасні дослідження і публікації геофізиків, геохіміків, петрологів, археологів, астрофізиків із загальним баченням Землі в цілому як космічного об'єкта, так і термоядерного реактора, всередині якого «кишить» велетенська енергія, що об'єднує всю нашу планету в єдине ціле. Тому ми звернулись до праць Смітсонівського інституту у Вашингтоні, Музею історії природи у Нью-Йорку, Британського музею в Лондоні, Інституту палеонтології людини у Парижі та інших авторитетних інституцій [23] з метою отримання найновітніших свідчень про історію Землі. Значний прорив у цьому належить «всесвітньому оку» – космічному телескопу Хаббла (рис. 4), який значно розширив знання про Всесвіт, галактику Чумацький шлях, Сонячну систему, її околиці – хмару Оорта та пояс Койпера, а також відкрив далекі світи. В цьому плані підтвердились побудови моделі Всесвіту Trinh Xuan Thuan [31].

Значно знизилась катастрофічність деяких процесів (Nadac Emil, [26]), за рахунок «вставок» еволюційних подій спростились міжрегіональні стратиграфічні кореляції (Н. Maruzak [28]). Збільшилась кількість палеокліматичних досліджень (М. Ф. Веклич [10], W. I. Gates [22]) як у загальному плані, так і особливо мезозойської ери (Juan Karlos Alonso [33, 34]) при детальних дослідженнях динозаврів. Уточнена історія цивілізацій, походження людини викладена в роботах O'Reilly Billy Dugart Martin [29], S. Wells [32], Харенберга Бодо, М. Ербе, К. Есенера та ін. [17], Y. Nagary [24], D. Clark [21]. Особливо визначним є дослідження геофізика-геохіміка R. M. Hazen [25], який розкрив деталі найдавніших еонів геологічної історії Землі – гадея та архея. Цікавими є його відтворення вигляду Землі із Космосу у різні етапи розвитку: Чорна Земля, Блакитна, Сіра, Руда, Сніжна Земля.

Із загального опису Землі як об'єкта геології відмітимо монографію Д. Палмера за ред. Джеймса Лера «Земля» [14].

Ці роботи є сучасним фундаментом, на якому будувалась система періодичності розвитку Землі.



Рис. 4. Космічний корабель «Дискавері» на шляху у відкритий космос з космічним телескопом «Хаббл» (HST)  
(Фото НАСА / ЄКА)

## Виклад основного матеріалу

Побудована автором Система періодичності розвитку Землі (таблиця 1) розкриває усі можливі галузеві періодичності, які можна використати для часового прогнозу.

**Космічна періодичність.** І порядок періодичності – галактичний рік – це синусоїда з довжиною хвилі у 240 млн р. Уже відбулось 19 галактичних (космічних) років. З давніх-давен наші предки цікавились зоряним небом, склали міфічні пояснення природним явищам. Окремі уявлення увійшли навіть у Біблію та інші релігійні постулати. Наукові дослідження з'явилися в епоху Відродження і були обґрунтовані появою телескопа та побудовою математичного апарату формалізації мислення. У XIX-XX століттях, в період інструментальних спостережень, особливо після катастрофічних паводків 1911, 1927, 1941, 1955, 1969, 1980, 1988, 2002 та 2020 років, дослідження і публікації охопили широке коло наукових проблем: глобальні кліматичні зміни в бік потепління, баланс тепла – холоду, зволоження – аридизації, зледеніння – міжльодовиків'я та ін.

Створення Всесвіту було переходом із нічого у щось, що залишається поза рамками сучасної науки. Є кілька альтернатив щодо появи Всесвіту: 1) це доказ існування Бога-Творця; 2) це процес саморозвитку; 3) це втручання якихось сутностей із іншого (не нашого) Всесвіту, які «запустили» механізм Великого вибуху і, нарешті, 4) це втручання НЛО із інших Всесвітів, яким загрожувала



**Геологічна періодичність** (табл. 1) виражена чотирма порядками синусоїд II, III, IV і V – 1750, 1650, 41 і 14 млн р., якими проявляються тектоно-магматичні (геотектонічні) цикли, епохи, етапи і фази. Їх внутрішню структуру розкрив Р. М. Hazen [25]. Вперше охарактеризований гадейський еон, аналогом якого в українській науковій літературі є глибокий докембрій або ранній архей. Назва «гадейський» походить від імені давньогрецького бога підземного світу Гадеса, відомого як Аїд, Аїдонеї, у римлян – Плутон [25].

На рубежі гадею та архею з'явилися перші живі організми – одноклітинні прокаріоти (рис. 5). Цікаві дані отримані з проблем співвідношення стадій тектоно-магматичних циклів з ярусами геохронологічної шкали. Тектоно-магматичні цикли тривалістю 175 млн р. виділяють на основі проходження усіх стадій геотектонічного розвитку – океанічної, геосинклінальної, складчасто-гороутворювальної і платформової. Їх тривалість – від 30 до 50 млн р., за винятком силурійської платформової (13 млн р.) і молодих палеогенових – геосинклінальних (21 млн р.) і платформової (11 млн р.).

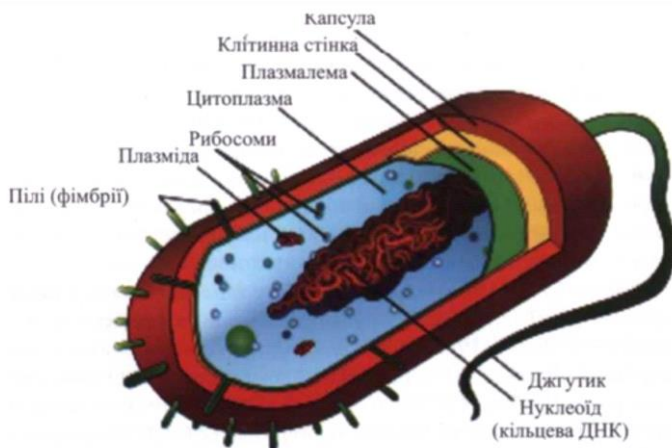


Рис. 5. Найдавніші мікроорганізми – одноклітинні бактерії прокаріоти. Збільшено у 100 разів. Гадей, 2,8–3,0 млрд років тому, Канада

Яруси (віки) виділяються на основі змін фауністичних комплексів, що ведеться ще з XIX ст. (М. Неймар, 1902) [13]. Це відбувається не тільки згідно зі змінами історико-геологічних чинників, а й за законами генетики. Як пише відомий сучасний науковець S. Wells [32], спочатку у ДНК відбувається мутація (зміни коду, помилка, несподіваний вплив зовнішніх причин та ін.). Таких змін у кожної особи буває до 30 протягом життя. Якщо мутація закріплюється, то відбувається накопичення їх і таким шляхом з'являються нові фауністичні комплекси.

Із таблиці 1 видно, що тривалість ярусу (віку) з керівними формами фауни чи, рідше, флори складає від 5–6 до 9–11. Що може впливати на таку періодичність? Скоріше всього – це закономірні зміни магнітних полюсів: південний переміщується на місце північного, а той – навпаки. Палеомагнітологи нарахували десятки таких змін тривалістю від кількох мільйонів до сотень тисяч років. Ми живемо в епоху Брюнес (останні 700 тис. р.). Перед нею була палеомагнітна епоха Матуяма тривалістю

2–3 млн р. Полюси переміщуються досить повільно – 10 тисяч років. Якщо цей процес триває кілька мільйонів років, то це і призводить до мутацій в ДНК і змін одних фауністичних комплексів іншими, тобто новими. Здається, що ми наблизились до розгадки цього історико-геологічного явища, хоча «завіса» лиш привідкрита.

**Геоморфологічна періодичність** – це IV (45 млн р.) і V (10 млн р.) порядки періодичності, обумовлені змінами епох вирівнювання рельєфу та епохами його глибокого розчленування під час гороутворювальних процесів, які керуються рухом літосферних плит. Глибокі кліматичні зміни при цьому сприяють вивітрюванню гірських порід на поверхню вирівнювання до гідрослюд, каолінітів, монтморюнітів, латеритів. Це породжує багато різноманітних родовищ корисних копалин – розсипного золота, алмазів, платини, бокситів та ін.

Геоморфологічний етап розвитку Землі був багатим на різноманітну рослинність – араукарії, гінкго, папоротникові, сагові та ін., що дало велику масу рослинної їжі для гігантів суші – динозаврів (рис. 6), яких нараховують до 1000 видів. Окремі досягають довжини 30 м, висоти 10–15 м і ваги більше 100 тонн. Епоха динозаврів поклала початок епосі птахів, крокодилів, водних іхтіозаврів і т. ін. А у підліску, зовсім скромно, з'явились ще у тріасовому періоді наші далекі пращури – ссавці (рис. 7). Вони мали вигляд землерийок, мишей і нічим себе не видавали поруч з грізними звірозячерами.

Однією із головних подій геоморфологічної періодичності (мезозою) був розпад єдиного материка Пангеї, вздовж розколу якого у зоні спредінгу формувались два нових континенти – північний Лавразія і південний Гондвана.

У мезозої – палеогені – середньому пліоцені Земля пережила низку крупних космічних катастроф – зіткнення з астероїдом Попигай на півночі Якутії у ранній крейді та астероїдом Чукусулуб у пізній крейді – 65 млн років тому, на півострові Юкатан, палеоцен-еоценовий термічний максимум – 52 млн років тому, спалахи наднових зірок, продовження у ранньому тріасі пермського глобального виверження трапів у Сибіру як наслідок антиподного ефекту від зіткнення Землі з Антарктичним астероїдом.

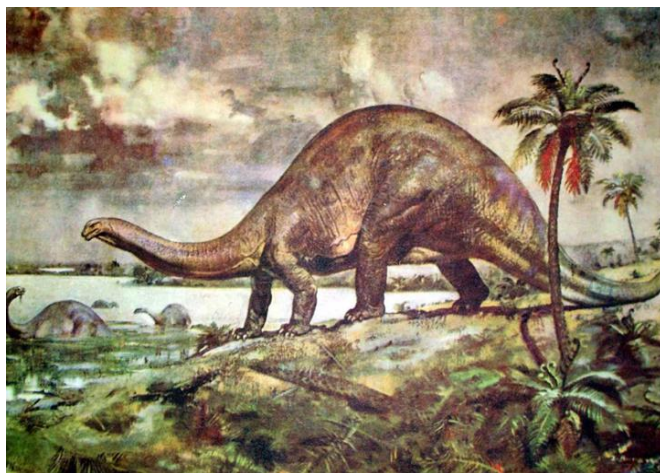


Рис. 6. Пізньоюрський бронтозавр.  
Американський музей історії природи у Нью-Йорку [14]

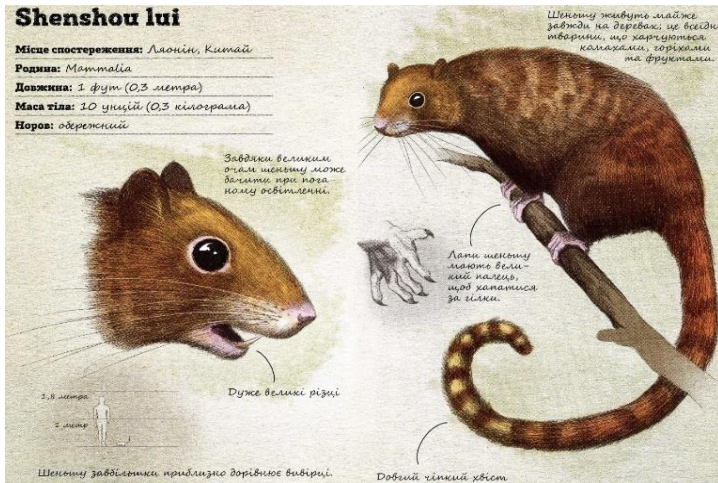


Рис. 7. Наші давні пращури – перші ссавці. Тріас Китай [33]

Усе це призвело до масового вимирання усього живого на Землі – проявилось вимирання на рубежі тріасу і юри, спровоковане спалахом наднової зірки.

Мезозойська частина геоморфологічного етапу проявилась IV (45 млн р.), а палеоген-середньоміоценова – V (10 млн р.) порядками.

**Палеогеографічні періодичності** (табл. 1) серед усіх інших явились найбільш повними, з кількома розмірами середньої довжини хвилі синусоїд, які їх відтворюють. Маємо вікові підрозділи – які дозволяють відновити події, від кількох десятків і сотень тисяч років до 1 року.



Рис. 8. Mammuthus primigenius із Старуні, 1907. Природознавчий музей, Львів. Реставрований у 2019 р.

VI порядок палеогеографічної періодичності у 9000 років виявлено R. Stephanowich-Rybka [30] у розрізах біогенних намулів, глин і торфів Старунського палеонтологічного місцезнаходження мамонта *Mamunthus primigenius* Blum (рис. 8) і волохатих носорогів *Rhinoceros antiquitatis* Blum (рис. 9) [3].



Рис. 9. Носорог №1 із Старуні. Віслінське зледеніння, 45-15 тис. років тому. Природознавчий музей НАНУ, Львів

VII порядок палеогеографічної періодичності – це 1830-річні **епохи зволоження А. В. Шнітнікова** Каспійського та Азовського морів, пльовіальних та аридних епох у Сахарі, Середній та Центральній Азії.

VIII порядок палеогеографічної періодизації (800 р.) – це **дендрохронологічна періодизація** по річних кільцях на стовбурах дерев [1]. Найдовші періоди відновлені по соснах Каліфорнії (Стежка Мафусаїда, сосни Швеції) та по «стрічкових глинах» післяльодовикових озер острова Готланд у Балтійському морі.

VIII і IX порядки (650, 600 р.) палеогеографічної періодичності переходять у **мікроциклічну періодичність** голоцену (XIII порядок –  $11 \pm$ ), яка обґрунтована палеопедологічними та палеопалінологічними комплексами по багатьох розрізах ґрунтово-лісових серій. Автор, як і переважна більшість дослідників голоцену, дотримується точки зору, що природа голоценової мікроциклічності пов'язана з космічними причинами: коливаннями сонячної активності з періодом  $11 (\pm 1,6)$  років, змінами параметрів орбіти Землі – екліптики, відхиленням її осі, поперемінним обміном полюсами.

Дендрохронологічна періодичність дає досить детальний матеріал аж до однорічних коливань клімату, але вивчена недостатньо. В Україні є немала кількість тисячолітніх дерев у Карпатах, на Слобожанщині, Подніпров'ї. Їх стовбури можна вивчати, відбираючи керни, зовсім не спилюючи дерев. Їх тисячолітню історію можна нарощувати ще на кілька сотень років за рахунок дерев'яних брусів, перекриттів, огорожок давніх фортець у Тустані, Кам'янець-Подільському, Хотині, Білгород-Дністровському та ін.



**Археологічна періодичність** (табл. 1) – X порядок періодичності (500 р.) – це поява і розвиток давньої людини (рис. 10) [17].

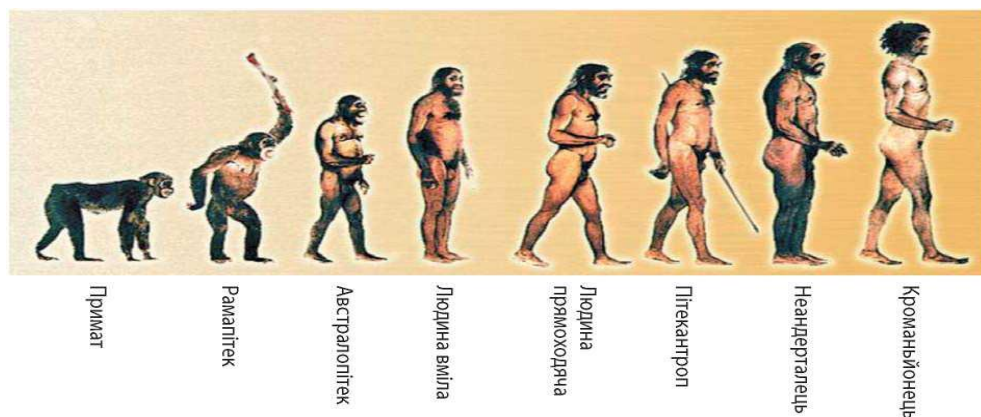


Рис. 10. Родовід людини

Детальні дослідження мезозойської ери дозволяють значно «понизити» початок людської історії. Її потрібно починати не з олігоценних лемуриків, а з появи ссавців ще у тріасовому періоді, 200 млн років тому. Ці маленькі тваринки уже мали плаценту і народжували діток живими, що було дуже прогресивною генетичною ознакою, порівняно з динозаврами, які розмножувались відкладанням яєць.

Велику роль для періодичності історії людства мали археологічні розкопки давніх стоянок епох олдувея, дошея, шеля, мусьте, ориньяку, солютре, мадлена. Досягнення генетики дозволили значно скоротити кількість видів, які виявились регіональними, до єдиного виду *Homo erectus* [17].

XI порядок **періодичності** (300 р.) – це **історія цивілізацій**, що розвивались на території нинішньої України, протягом двох тисяч років від кіммерійців бронзової доби, скіфів залізної доби, сарматів до слов'ян Київської Русі.

Поєднання зусиль археологів та істориків відкрило не тільки подробиці існування наших предків, а й причини їх міграцій із Центральної Азії у Європу. Такою причиною стали періодичні зміни клімату, що рухали великі переселення народів зі сходу на захід.

XII порядок періодичності (33 р.) – це **літописна періодичність** (табл. 1) останніх 1000 років: спочатку термічний оптимум кінця тисячоліття до Різдва Христового у XII ст. н. е. змінився малим льодовиковим періодом, а в кінці XVIII – на початку XIX ст. – сучасним потеплінням.

XIII порядок періодичності ( $11 \pm 1$  рік) – це сучасні зміни сонячної активності (11-річні числа Вольфа), що свідчать про вплив космічних чинників.

В останні роки активізувались катастрофічні паводки, спекотні періоди, повернення холодів влітку, масові зсувні процеси, що є результатом глобального кліматичного потепління, пов'язаного як з природними, так і техногенними причинами. Чи виникали такі ситуації раніше в геологічній історії Землі? Чи можна їх передбачити в майбутньому, щоб запобігти масовій загибелі людей або всього людства. Такі питання проілюстровані **підсумковою синусоїдою** – як результат накладання усіх 13 порядків синусоїд (табл. 1).

Аналізуючи численні дослідження глобальних кліматичних змін зарубіжних та вітчизняних вчених, автор побудував графіки глобальних кліматичних змін, які пояснюються як космічними (галактичні роки), так і земними причинами – тектоно-магматичними епохами розвитку земної кори. Останні починаються активними рухами літосферних плит і закінчуються складчастістю та гороутворенням, що призводить до похолодань і зледенінь.

Отже, у прогнозуванні паводків є три складові: перша – де вони можуть проявитись, друга – максимально можливий підйом води і третя – коли настане черговий катастрофічний паводок. Перші дві ми можемо прогнозувати з ймовірністю 75–80%, а третю – поки що тільки з ймовірністю 50%.

## **Обговорення результатів та висновки**

Основні проблеми, що висвітлені у цій статті, ґрунтуються на детальному аналізі космічної, геологічної, геоморфологічної, палеогеографічної, археологічної, літописної та інструментальної інформації.

1. Космічна періодичність закладає основи усім іншим перерахованим вище ритмічним проявам коливань природних процесів, у тому числі і катастрофічним паводкам, через які й почались наші дослідження. Важко в це повірити, але через обертання нашої галактики Чумацького шляху навколо свого центру кожні 225–250 млн років (космічні або галактичні роки) формувались галактики із газово-пилових хмар-туманностей, спалахували наднові зірки у галактиках, змінювались полюси магнітного поля Сонця з одного положення на інше, відчувався вплив велетенської планети Юпітер на астероїди і комети, що прямують до Землі, але під силою гравітації відхиляються, а іноді знищуються, нібито «прикриваючи» нас від космічних бомбардувань, – усе це «запускає» складний механізм взаємодії Землі з Космосом.

Багато нового було відкрито в останні десятиліття завдяки космічному телескопу Хаббл та численним космічним кораблям і станціям на Місяць, Марс, Венеру, в околиці Юпітера, Сатурна, Урана, Нептуна та Плутона, до хмари Оорта та поясу Койпера. Це значно розширило межі Всесвіту та відкрило нові космічно-земні зв'язки.

2. Періодичність процесів на Землі багато в чому залежить не тільки від впливу космічної періодичності, а й народжується на нашій планеті. Це – ендегенна геодинаміка, яку зумовлюють глибинні шари розрідженої гарячої (до кількох тисяч градусів за Цельсієм) речовини у зовнішньому ядрі, шарі Д нижньої мантії, звідки вгору до земної кори піднімаються конвенційні течії та плюми, що створюють зони спредингу – розсування між літосферними плитами, які рухаються зі швидкістю до 10–20 см за рік, створюючи нові океани. Геологічна періодичність обумовлена постійною зміною розподілу суші і океанів, впливом різких кліматичних коливань від аридних пустельних до вологи тропічних і материкових зледенінь. Усе це ускладнюється випадковими ударами по нашій планеті астероїдів, метеоритів, малих планет, спалахами наднових зірок, коливаннями параметрів орбіт Чумацького шляху, Сонячної системи та самої Землі.

3. У мезозої, палеогені і неогені відбулось кілька епох вимирання: продовжувалось велике пермське вимирання, друге проявилось на рубежі юри і крейди, третє – в кінці крейди, коли загинули динозаври від удару по Землі

Чикбсулакського астероїду на березі Мексиканської затоки, а четверте – палеоцен-еоценовий термічний максимум незрозумілого походження. Поки що проблематичним залишається друге вимирання, а перше – пермське – пов'язують з ударом Антарктичного астероїда, антиподом якого стали розплави сибірських трапів.

4. Найбільш показовою, насиченою фактами, була палеогеографічна періодичність, тому що вона базувалась на великій кількості різноманітних параметрів, а саме глобальні кліматичні зміни від субтропиків до зледенінь, епохи зволоження внутрішньоматерикових пустель, вивчення довгоростучих дерев дендрохронологічним методом, мікрокліматичні фази голоцену і пізнього плейстоцену, відкладення сезонних світло- і темносірих «стрічкових глин» післяльодовикових озер та ін. Палеогеографи вдало використовують розмаїття цих параметрів для своїх реконструкцій і тому досягли детальних подробиць у реконструкціях змін ландшафтів, кліматів, рослинного і тваринного світу протягом палеогеографічного етапу.

5. Наступна – археологічна періодичність вже не має такої деталізації, як у попередньої – палеогеографічної, але має свої цікаві досягнення. Головне – це вдалось «заглибити» геологічний вік наших предків – ссавців, від традиційних олігоценів лемуриків (20 млн р.) майже у 10 разів – до тріасових «морських мам» – примітивних ссавців типу нинішніх мишей, які вже мали плаценту і виношували своїх дітей в утробі, народжуючи їх живими. Після загибелі динозаврів, 65 млн років тому, ці примітивні ссавці швидко завоювали сушу і дали 5 млн років тому спільного предка шимпанзе і людини.

Іншим досягненням археологічної періодичності було об'єднання численних «видів» Номо, які насправді були регіональними, у єдиний вид *Homo erectus*.

Історія розвитку цивілізацій на території України, яка вивчалась у розкопках археологів, була доповнена істориками, що зробило її більш повною та різноманітною. При цьому з'ясувалось, що зміни цивілізацій киммерійців скіфами, скіфів сарматами, а потім слов'янами відбувались під впливом кліматичних коливань. Кожна аридизація клімату у Центральній Азії змушувала племена кочівників мігрувати на захід, завойовуючи Європу.

Таким чином, археологічна періодичність стає важливим параметром змін довкілля на Землі.

6. Літописні свідчення про зміни довкілля проаналізовані з VIII до початку XIX століть. В них збереглися дуже цінні записи не тільки про цікаві для нас катастрофічні паводки і повені, а й про інші катастрофічні явища – посухи, повернення холодів влітку, ранні осінні морози, бурі та вітровали, голодні роки. Тому побудована таблиця малого кліматичного оптимуму, малого льодовикового періоду та наступного сучасного потепління з внутрішніми деталями цих кліматичних епох має важливе значення для реконструкції відповідних змін природи.

7. Але найважливіша інформація має місце у період інструментальних спостережень, з 1881 року і до сьогодення. Виявлено, що до 1940-х років продовжувалось потепління, потім, у 1940-1970-х роках відбулась стабілізація кліматичних змін, а після цього і дотепер відбувається зростання темпів глобального потепління, особливо в останні два десятиліття. За останні сто років відбулось вісім паводків з періодичністю від 6 до 19 років, у середньому 11 років. Це дивним чином співпадає з періодами сонячної активності (знову

вплив космічної періодичності), а відхилення можуть бути як природними, так і антропогенними. Ці 11-річні цикли (числа Вольфа) впливають також на соціальні процеси і навіть на основні події із життя окремих людей [10].

Проаналізувавши максимально можливий перелік окремих періодичностей, було встановлено 13 їх порядків. Об'єднавши усі у єдину спільну періодичність, було розроблено синусоїду, яка дозволила розрахувати прогноз паводку 2020 року, який підтвердився через 6 років від опублікування [7].

Результатом усіх досліджень стала «система періодичностей розвитку Землі», якою можна користуватись для подальших передбачень.

Але на завершення ще раз підкреслимо, що не має значення, коли відбудеться наступний паводок, у 2028, 2032 чи іншому році. Важливо, що він обов'язково відбудеться і до нього потрібно науково обґрунтовано підготуватись!

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Адаменко О.М. Вступ до екологічної дендрохронології / О.М. Адаменко, Я.Д. Гладен, В.В. Куліш. – Івано-Франківськ : Голіней, 2014 – 24 с.
2. Адаменко О.М. Стан довкілля у річкових долинах з катастрофічними паводками. Перший етап екологічних досліджень на Дністровському протипаводковому полігоні (2012–2018 рр.) / О.М. Адаменко, Д.О. Зорін – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018 – 240 с.
3. Адаменко О.М. Старуна: Парк Льодовикового періоду / О.М. Адаменко, О.М. Карпаш, Д.О. Зорін, М. Котарба, І.В. Мосюк, І.І. Ковбанюк. Видання друге. – Івано-Франківськ: Голіней, 2020. – 206 с.
4. Адаменко О.М. Палеогеографічні зміни плейстоцен-голоценових ландшафтів Прикарпаття (за даними розрізів геологічної пам'ятки Старуна) / О.М. Адаменко, М.І. Мосюк // Український географічний журнал, 2020. – № 3. – С. 30–35.
5. Адаменко О.М. Стан довкілля території Дністровського регіонального ландшафтного парку / О.М. Адаменко, М.І. Мосюк, Д.О. Зорін // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», вип. 53, 2020. – С. 227–238.
6. Адаменко Я.О. Галицький протипаводковий полігон / Я.О. Адаменко, О.М. Мандрик, Л.М. Архипова, Н.О. Зоріна // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування, 2011 – № 1(3). – С. 76–80.
7. Екологічна безпека територій: монографія [Адаменко О.М., Адаменко Я.О., Зорін Д.О., та ін. ] – Івано-Франківськ: Супрун, 2014. – 444 с.
8. Ковальчук І.П. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз / І.П. Ковальчук – Львів: Інститут українознавства, 1997. – 440 с.
9. Кравчук Я.С. Геоморфологія Прикарпаття / Я.С. Кравчук. – Львів : Меркатор, 1999. – 188 с.
10. Матвіїшина Ж.М. Просторово-часова кореляція палеогеографічних умов четвертинного періоду на території України / Ж.М. Матвіїшина, Н.П. Герасименко, В.І. Передерій та ін. – Київ : Наукова думка, 2010. – 192 с.
11. Маринич О.М. Фізична географія України / О.М. Маринич, П.Г. Шищенко. – Київ: Знання, 2006. – 511 с.
12. Мороз С.А. Історія біосфери Землі. Кн.2. Геолого-палеонтологічний життєпис / С.А. Мороз – Київ: Заповіт, 1966. – 422 с.
13. Неймайр М. История Земли. Том II / М. Неймайр. – Санкт-Петербург : Просвещение : 1902 – 848 с.
14. Палмер Д. Земля / за ред. Джеймса Ф. Лера / Д. Палмер. – Київ: Енциклопедія, 2005. – 847 с.

15. Рудько Г.І. Тиск на біосферу: реанімація чи шлях на Марс / Г.І. Рудько, О.М. Адаменко. – Київ – Чернівці: Буркрек, 2014. – 336 с.
16. Трофимчук О.М. Геоінформаційні технології захисту природно-заповідного фонду / О.М. Трофимчук, О.М. Адаменко, В.М. Триснюк. – Івано-Франківськ: Супрун, 2021. – 343 с. + 250 іл.
17. Харенберг Бодо. Хроника человечества / Байсер Б., Дрекспаде Р., Эрбе М., Эсенер К., Фиршин Г.Й., Фишер Н., Галмейст П., Бельгия: БРЕПОЛЗ, 1994. – 1167 с.
18. Adamenko O.M., 2019. The Upper Pleistocene stratigraphy of the Strunga site as a bridge between the stratigraphical frameworks of Western Europe and the plaine area of Ukraine. – *Jornal of Geology, Geography and Geocology*, 28(2): 213-220.
19. Alexandrowicz, S.W., 2004. Starunic and the Quarternary research in the traditional and initiatives of the Polish Academic of the Art and Selece / *Starunia I materialy do dziejow Polskej Academic Umiajetrosteci. Polish Academic of Art and science / Krakow* : 3-261 [In Polish, English summary].
20. Boguckiy A. Stratigrafia lessow Naddnistrza halickiego / A. Boguckiy, M. Jancont // *Jessy i paleolit Naddnistrza Nalickiego (Ukrain) / – Studia geologia Polonica. – Krakow, 2002. – Vol. 119 – Cz. III. – P. 315-341.*
21. Clazk, D., 1982. The Arctic Ocean and Post-Jurassic Paleoclimatologic // *Climate in Earth History // Nat. Acad. Press. Wasbington D.C., Chap. 14: 16-32*
22. Gates, W.I., 1982. A review with reference for pre-Pleistocene // *Climate in Earth History // Nat. Acad. Press, Washington D.C. Chap. 2: 47-60.*
23. A review with reference for pre-Pleistocene // *Climate in Earth History // Nat. Academ. Press. – Washington D.C. Chap. 2: 47-60.*
24. Harari, Y., 2014 *Sapiens. A Brief Hystory of the mankind. – London : Hazvill Secret : 3-444.*
25. Hazen, R.M., 2012. *The Story of Earth. The First 4.5 Billion Years, from Stardust to Living Planet. – New York : Penguin Books : 3-306.*
26. Hadac Emil. *Ecologiccka Katastrofy. – Praga, 1987. – 320 s.*
27. Lanczont M. *Jessy i paleolit Naddnistrza Nalickiego (Ukraine) / Studia geologia Polonica. – Krakow, 2002. – Vol. 119 – P. 3-391.*
28. Maruczak, H., 1996. *Korelacia stratigraphicna polskiech ukrainskish I nicmieckich. – Biuleten Panstwowego institute Jeologicznego, 373: 107-115.*
29. O'Reilly Bill, Dugard Martin, 2013. *Killing Jesus. Henzy Holt and Company. – New York : 3-320.*
30. Sokolowski, T., Stachowich-Rybka, R., 2009. *Chronological and changes of environment of Late Pleistocene and Holocene at Starunya paleontological Site and vicinity (Carpatian region, Ukraine). – Annales Societatis Jeologorum Polonic, 79: 315-331.*
31. Trinp Xuan Tbulan, 2002. *Le destin de l'univers le big bang at après. – Moskva: Astrel – ACT: 5-160.*
32. Wells S., 2003. *The Jorney of Man: A genetic Odissey / Spensez Wells: London: Pinguin Books: 3-224.*
33. Juan Karlos Alonso, Yregory S. Paul, 2016. *Ancient Earth Jornal : The Late Jurnal Jurassic: Note, Drawings and Observations from Prehistory. – Walter Foster Jr.: 3-112.*
34. Juan Karlos Alonso, Yregory Paul S., 2015. *Ancient Earth Jurnal: The Early Cretaceous: Note, Drawings and Observations from Pzehistory. – Walter Foster Jr.: 3-112.*

*Стаття надійшла до редакції 11.11.2021 і прийнята до друку після рецензування 26.04.2022*

## REFERENCE

1. Adamenko, O.M., Hladen, Ya.D., & Kulish, V.V. (2014). Introduction to ecological dendrochronology [Vstup do ekolohichnoyi dendrokronolohiyi]. Ivano-Frankivs'k: Holiney [In Ukrainian].
2. Adamenko, O.M., & Zorin, D.O. (2018). The state of the environment in river valleys with catastrophic floods. The first stage of environmental research at the Dniester flood test site (2012-2018) [Stan dovkilliya u richkovykh dolynakh z katastrofichnymy pavodkamy. Pershyy etap ekolohichnykh doslidzhen' na Dnistrovs'komu protypavodkovomu polihoni (2012-2018 rr.)]. Ivano-Frankivs'k: IFNTUNH [In Ukrainian].
3. Adamenko, O.M., Karpash, O.M., Zorin, D.O., Kotarba, M., Mosyuk, I.V., & Kovbanyuk, I.I. (2020). Starunya: Ice Age Park [Starunya: Park L'odovkovoho period] (2<sup>nd</sup> ed.). Ivano-Frankivs'k: Holiney [In Ukrainian].
4. Adamenko, O.M., & Mosyuk, M.I. (2020). Paleogeographic changes of Pleistocene-Holocene landscapes of Prykarpattia (according to sections of the geological monument Starunya) [Paleoheohrafichni zminy pleystotsen-holotsenovykh landshaftiv Prykarpattya (za danymy rozriziv heolohichnoyi pam'yatky Starunya)]. *Ukrayins'kyi heohrafichnyy zhurnal*, 3, 30-35 [In Ukrainian].
5. Adamenko, O.M., Mosyuk, M.I., & Zorin, D.O. (2020). The state of the environment in the Dniester Regional Landscape Park [Stan dovkilliya terytoriyi Dnistrovs'koho rehional'noho landshaftnoho parku]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universytetu im. V.N. Karazina, seriya «Heolohiya. Heohrafiya. Ekolohiya»*, 53, 227-238 [In Ukrainian].
6. Adamenko, Ya.O., Mandryk, O.M., Arkhypova, L.M., & Zorina, N.O. (2011). Galician flood proving ground [Halyts'kyi protypavodkovykh polihon]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannya*, 1(3), 76-80 [In Ukrainian].
7. Adamenko, O.M., Adamenko, Ya.O., Zorin, D.O., et al. (2014). Ecological safety of territories [Ekolohichna bezpeka terytoriy: monohrafiya]. Ivano-Frankivs'k: Suprun [In Ukrainian].
8. Koval'chuk, I.P. (1997). Regional ecological and geomorphological analysis [Rehional'nyy ekoloho-heomorfolohichnyy analiz]. L'viv: Instytut ukrayinoznavstva [In Ukrainian].
9. Kravchuk, Ya.S. (1999). Geomorphology of Prykarpattia [Heomorfolohiya Prykarpattya]. L'viv: Merkator [In Ukrainian].
10. Matviyishyna, Zh.M., Herasymenko, N.P., Perederiy, V.I. et al. (2010). Spatial-temporal correlation of paleogeographic conditions of the Quaternary period on the territory of Ukraine [Prostorovo-chasova korelyatsiya paleoheohrafichnykh umov chetvertynnoho periodu na terytoriyi Ukrayiny]. Kyiv: Naukova dumka [In Ukrainian].
11. Marynych, O.M., & Shyshchenko, P.H. (2006). Physical geography of Ukraine [Fizychna heohrafiya Ukrayiny]. Kyiv: Znannya [In Ukrainian].
12. Moroz, S.A. (1966). History of the Earth's biosphere. Book 2. Geological and paleontological biography [Istoriya biosfery Zemli. Kn.2. Heoloho-paleontolohichnyy zhyttyepys]. Kyiv: Zapovit [In Ukrainian].
13. Neymayr, M. (1902). History of the Earth [Ystoryya Zemly]. Tom II. Sankt-Peterburh: Prosveshchenye [In Russian].
14. Palmer, D. (2005). Earth [Zemlya] (Dzheym F. Ler, Ed.). Kyiv: Entsyklopediya [In Ukrainian].
15. Rud'ko, H.I., & Adamenko, O.M. (2014). Pressure on the biosphere: resuscitation or the way to Mars [Tysk na biosferu: reanimatsiya chy shlyakh na Mars]. Kyiv – Chernivtsi: Burkrek [In Ukrainian].
16. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for the protection of nature reserves [Heoinformatsiyni tekhnolohiyi zakhystu pryrodno-zapovidnoho fondu]. Ivano-Frankivs'k: Suprun [In Ukrainian].
17. Kharenberh, B., Bayser, B., Drekskhade, R., Érbe, M., Éseney, K., Fyrshyn H.Y. et al. (1994). Chronicle of humanity [Khronyka chelovechestva]. Bel'hyia: BREPOLZ.

18. Adamenko, O.M. (2019). The Upper Pleistocene stratigraphy of the Strunga site as a bridge between the stratigraphical frameworks of Western Europe and the plain area of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(2), 213-220.
19. Alexandrowicz, S.W. (2004). Starunice and the Quaternary research in the traditional and initiatives of the Polish Academy of Art and Science. In *Starunia I materiały do dziejów Polskiej Akademii Umiajętrości* (pp. 3-261). Krakow: Polish Academy of Art and Science [In Polish, English summary].
20. Bogucki, A., Jancont, M. (2002). Stratigrafia lessow Naddnistrza halickiego (Ukraine). *Studia geologia Polonica*, 119(III), 315-341.
21. Clazk, D. (1982). The Arctic Ocean and Post-Jurassic Paleoclimatology. In *Climate in Earth History* (Chap. 14: 16-32). Washington D.C.: Nat. Acad. Press.
22. Gates, W.I. (1982). A review with reference for pre-Pleistocene. In *Climate in Earth History* (Chap. 2: 47-60). Washington D.C.: Nat. Acad. Press.
23. A review with reference for pre-Pleistocene. In *Climate in Earth History* (pp. 47-60). Washington D.C.: Nat. Acad. Press.
24. Harari, Y. (2014). *Sapiens. A Brief History of the Mankind*. London: Hachette.
25. Hazen, R.M. (2012). *The Story of Earth. The First 4.5 Billion Years, from Stardust to Living Planet*. New York: Penguin Books.
26. Hadac, E. (1987). *Ecologiczna Katastrofa*. Praga.
27. Lanczont, M. (2002). Jessy i paleolit Naddnistrza Nalickiego (Ukraine). *Studia geologia Polonica*, 119, 3-391.
28. Maruczak, H. (1996). Korelacja stratygraficzna polskich ukraińskich i niemieckich. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 373, 107-115.
29. O'Reilly, B., & Dugard, M. (2013). *Killing Jesus*. New York: Henry Holt and Company.
30. Sokolowski, T., & Stachowicz-Rybka, R. (2009). Chronological and changes of environment of Late Pleistocene and Holocene at Starunice paleontological Site and vicinity (Carpathian region, Ukraine). *Annales Societatis Geologorum Polonic*, 79, 315-331.
31. Trinp Xuan Tbuon. (2002). *Le destin de l'univers le big bang at après*. Moskva: Astrel.
32. Wells, S. (2003). *The Journey of Man: A genetic Odyssey*. London: Penguin Books.
33. Alonso, J.K., & Paul, Y.S. (2016). *Ancient Earth Journal: The Late Jurassic: Note, Drawings and Observations from Prehistory*. Walter Foster Jr.
34. Alonso, J.K., & Paul, Y.S. (2015). *Ancient Earth Journal: The Early Cretaceous: Note, Drawings and Observations from Prehistory*. Walter Foster Jr.

*The article was received 11.11.2021 and was accepted after revision 26.04.2022*

**Адаменко Олег Максимович**

доктор геолого-мінералогічних наук, професор, професор кафедри екології  
Центр прогнозування та попередження техногенно-гідроекологічної небезпеки  
Прикарпаття Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу  
**Адреса робоча:** 76019 Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0821-3011> **e-mail:** yarad1964@gmail.com

UDC 502.2:681.324:355.3

**Serhii M. Chumachenko**<sup>1</sup>, Dr.Sc. (Tech), Professor  
ORCID ID: 0000-0002-8894-4262 *e-mail*: sergiy23.chumachenko@gmail.com

**Yevhenii O. Yakovliev**<sup>2</sup>, Dr.Sc. (Tech), Chief Research Scientist  
ORCID ID: 0000-0001-6934-618X *e-mail*: yakovlevhydro@gmail.com

**Oleksiy V. Pyrykov**<sup>3</sup>, PhD (Tech), Associate Professor  
ORCID ID: 0000-0002-7077-3645 *e-mail*: 0506463222av@gmail.com

**Andrey S. Partalyan**<sup>4</sup>, PhD (Tech)  
ORCID ID: 0000-0001-7149-8975 *e-mail*: partandrej@gmail.com

<sup>1</sup> National University of Food Technology, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Telecommunication and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> The Foundation of development of environmental and energy markets NGO, Lviv, Ukraine

<sup>4</sup> Ministry of Defense of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## **PECULIARITIES OF IMPLEMENTATION OF THE NETWORK OF ECOLOGICAL MONITORING OF COMBAT ACTION FOR THE ARMED FORCES OF UKRAINE**

**Abstract.** *The current ecological state of Ukraine's natural environment is largely determined by the consequences of hostilities taking place almost throughout its territory. The article considers the peculiarities of the implementation of the concept of a single network of environmental monitoring of hostilities for prompt response and preventive measures to prevent irreversible damage to the components of the environment, personnel and the population living in the vicinity of hostilities.*

*The analysis of the structural and logical model of the system of ecological monitoring of military-man-made objects and its adaptation to the monitoring of hostilities is carried out. A structural and functional scheme of the environmental monitoring system of hostilities has been developed, which allows to obtain detailed information from all four levels of subordination for the Armed Forces of Ukraine.*

*The types and nature of environmental information processed in the system of environmental monitoring of hostilities are determined. The architecture of the information-measuring system of ecological monitoring of combat operations and the peculiarities of the interaction of its components through the information-communication system of the Armed Forces of Ukraine have been developed.*

*Requirements to the information-measuring system of ecological monitoring of military operations are formed and the architecture of ecological-information systems on the basis of the effective concept of a data warehouse which generalizes all ecological information on influence of military actions on an ecological condition of environment of Ukraine is offered.*

*The structural and functional scheme of the information-analytical system of ecological monitoring of military operations is offered, which will allow to successfully implement the tasks listed in the article and to achieve high efficiency of ecological information use.*

**Key words:** *ecological monitoring; ecological military information; environment; armed forces; information and measuring system*



С.М. Чумаченко<sup>1</sup>, Є.О. Яковлев<sup>2</sup>, О.В. Піріков<sup>3</sup>, А.С. Парталян<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

<sup>3</sup> Експерт ГО «Фундація розвитку екологічних та енергетичних ринків», м. Львів, Україна

<sup>4</sup> Міністерство оборони України, м. Київ, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕРЕЖІ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ БОЙОВИХ ДІЙ ДЛЯ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

***Анотація.** Нинішній екологічний стан навколишнього природного середовища України в значній мірі визначається наслідками бойових дій, що проводяться майже на всій її території. В статті розглянуто особливості реалізації мережі екологічного моніторингу бойових дій для оперативного реагування і проведення попереджувальних заходів щодо недопущення безповоротного ураження складових навколишнього природного середовища, особового складу та населення, що проживає на прилеглих до зони бойових дій.*

*Проведено аналіз структурно-логічної моделі системи екологічного моніторингу воєнно-техногенних об'єктів та адаптація її до моніторингу бойових дій. Розроблено структурно-функціональну схему системи екологічного моніторингу бойових дій, яка дозволяє отримати детальну інформацію з усіх чотирьох рівнів підпорядкування для Збройних Сил України. Визначено види і характер екологічної інформації, що обробляється в системі екологічного моніторингу бойових дій. Розроблено архітектуру інформаційно-вимірювальної системи екологічного моніторингу бойових дій та особливості взаємодії її складових через інформаційно-комунікаційну систему Збройних Сил України.*

*Сформовано вимоги до інформаційно-вимірювальної системи екологічного моніторингу бойових дій та запропоновано архітектуру еколого-інформаційної системи на основі ефективної концепції сховища даних, що узагальнює всю екологічну інформацію про вплив бойових дій на екологічний стан навколишнього природного середовища України.*

*Запропоновано структурно-функціональну схему інформаційно-аналітичної системи екологічного моніторингу бойових дій, що дозволить успішно реалізувати перелічені в статті завдання та досягнути високої ефективності використання екологічної інформації.*

***Ключові слова:** екологічний моніторинг; екологічна військова інформація; навколишнє середовище; збройні сили; інформаційно-вимірювальна система*

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.23-34>

### Вступ

**Актуальність.** Успішна реалізація завдань Збройних Сил України з оборони держави в умовах неоголошеної війни з Російською Федерацією сьогодні можлива лише за рахунок науково обґрунтованої та балансової оптимізації використання наявних людських, матеріальних та еколого-природних ресурсів. В умовах ескалації збройного конфлікту з Росією необхідний темп досягнення і підтримки рівня оборонної спроможності визначається активністю ведення бойових дій Збройних Сил України (ЗСУ). Одночасно при

вирішенні цієї задачі виникає протиріччя між забезпеченням достатнього рівня інтенсивності бойових дій частин і підрозділів Збройних Сил України і необхідністю забезпечення відповідного рівня екологічної безпеки, який може бути досягнутий тільки за рахунок відповідних заходів щодо її забезпечення у військах з урахуванням асиміляційного потенціалу навколишнього природного середовища для театру воєнних дій [1].

На теперішній час система державного екологічного контролю має низьку інформаційну повноту, враховуючи велику насиченість території України потенційно небезпечними об'єктами (ПНО) та загрозу катастрофічного збільшення екологічних наслідків при їх руйнуванні. Недостатнє фінансування природоохоронних заходів та майже повна відсутність їх фінансування з 2014 року не дозволяють в повній мірі отримувати вірогідні екологічні оцінки та проводити заходи зі збереження та відновлення навколишнього природного середовища (НПС) в галузі екологічної безпеки. В цих умовах значно зростає роль екологічного моніторингу (ЕМ), як дієвого заходу для попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій воєнно-техногенного походження і контролю забруднення територій в районах ведення бойових дій [2, 3].

**Аналіз останніх публікацій** вітчизняних та зарубіжних авторів [3–9], присвячених проблематиці удосконалення системи екологічного контролю та моніторингу доквілля потенційно небезпечних об'єктів критичної інфраструктури (і, зокрема, в Збройних Силах), не дозволяє повною мірою провести систематизацію проблемних методологічних питань щодо побудови єдиної мережі ЕМ в ЗСУ.

З точки зору системного підходу до зменшення воєнно-техногенного навантаження на територіях ведення бойових дій можуть бути застосовані заходи за наступними напрямками: законодавчим; нормативно-правовим; фінансово-економічним; адміністративним; моніторингово-прогностичним; технологічним профілактично-попереджувальним; технологічним ліквідаційно-захисним; навчально-просвітницьким.

Різноманітність вищенаведених напрямків щодо розробки заходів для зменшення техногенного навантаження територій ведення бойових дій потребує розробки комплексних методик, для відпрацювання яких необхідно мати достовірну інформацію про екологічний стан цих територій. Тому **метою цієї публікації** є розгляд питань, пов'язаних з побудовою мережі екологічного моніторингу під час ведення бойових дій для ЗСУ.

## **Основний зміст**

На сьогоднішній день в рамках реалізації заходів із попередження надзвичайних екологічних ситуацій (НЕС) воєнно-техногенного походження при наявності об'єктів підвищеної небезпеки (ОПН) та об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) в районах ведення бойових дій існує напрямок щодо розробки екологічного портрету зони ведення бойових дій, метою якого є створення бази даних для системи екологічного моніторингу, визначення рівня екологічних загроз від бойових дій та розробка заходів для зменшення ризику виникнення НЕС воєнно-техногенного походження [11, 12].

Відповідно з покладеними на нього функціями (див. рис. 1) *екологічний моніторинг зони ведення бойових дій* включає в себе три основних напрямки –

спостереження за факторами воєнно-техногенного впливу і станом навколишнього середовища в районах ведення бойових дій, екологічну оцінку фактичного стану навколишнього середовища під час ведення бойових дій та прогноз і оцінку прогнозованого стану після їх закінчення.

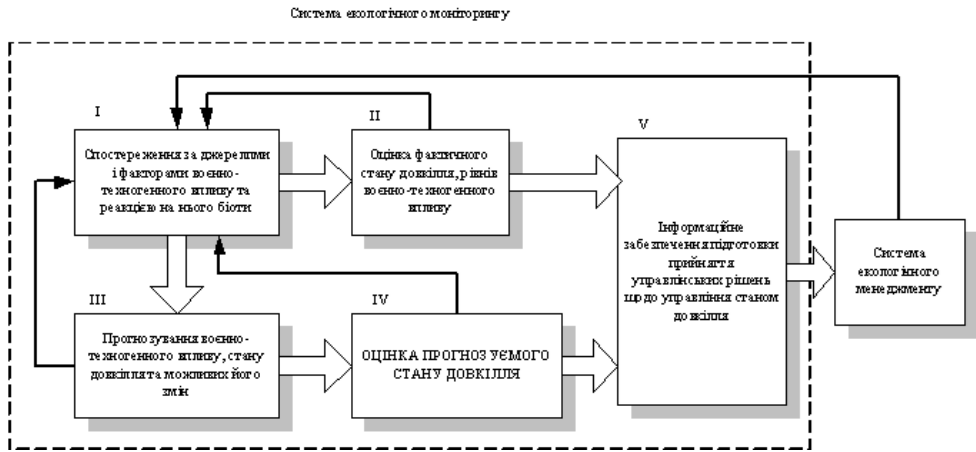


Рис. 1. Структурно-логічна модель системи екологічного моніторингу воєнно-техногенних об'єктів

Структурними одиницями, що підлягають безпосередньому екологічному моніторингу, є війська, що перебувають в районах дислокації, зосередження, на марші, на вихідних, стартових і вогневих позиціях, та інші військові об'єкти: аеродроми, військово-морські і військово-повітряні бази, військові кораблі і транспорт, пункти управління, вузли зв'язку, радіотехнічні системи виявлення, наведення і керування зброєю, органи логістики, вузли доріг, гідротехнічні споруди, трубопроводи, об'єкти критичної інфраструктури, підприємства, пов'язані з військовим виробництвом тощо.

Для забезпечення високої ефективності системи екологічного моніторингу в ЗСУ розробка її концепції повинна базуватися на системних принципах раціональної децентралізації, керованості, швидкого інформаційно-аналітичного реагування та автоматизації усіх процесів збору і обробки екологічної інформації.

Для розподілу рівнів сенсорного поля в системі екологічного моніторингу екологічних параметрів НПС зони інтенсивного воєнно-техногенного навантаження необхідно виходити із функцій ієрархічної системи управління екологічною безпекою ЗСУ на відповідних рівнях.

Узагальнена структурна схема відомчого екологічного моніторингу ЗСУ, що в певній мірі забезпечує ці вимоги, може бути представлена чотирьохрівневою ієрархічною структурою, наведеною на рис. 2.

Одним із ключових компонентів СЕМ є інформаційно-вимірювальна система екологічного моніторингу (ІВСЕМ), яка на сьогодні являється єдиним джерелом просторово-часової інформації про динаміку змін екологічного стану довкілля в районах ведення бойових дій. Вона представляє собою розподілену систему контролю ключових параметрів навколишнього природного середовища (НПС) у різних його складових (забруднення приземного повітря, поверхневих та ґрунтових вод, ландшафтів) і об'єктах екосистеми з метою збору, обробки даних

моніторингу і представлення результатів для особи, що приймає рішення в системі управління екологічною безпекою ЗСУ.

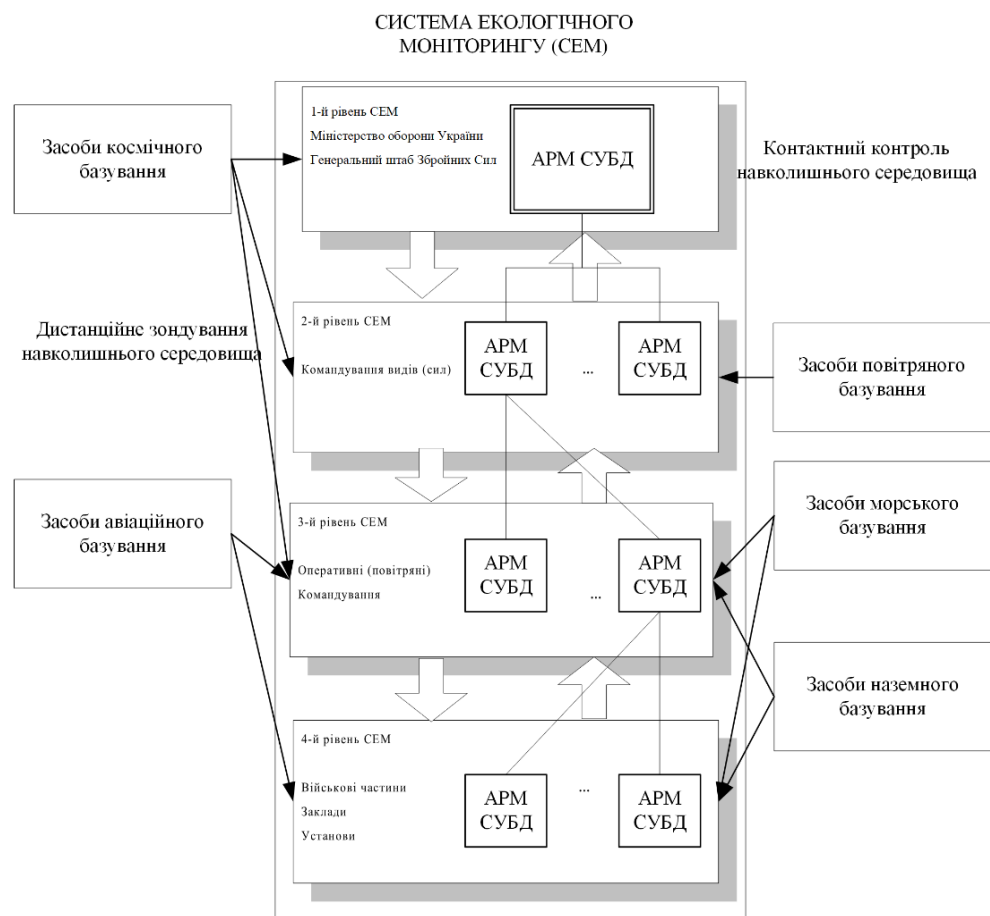


Рис. 2. Структурно-функціональна схема системи екологічного моніторингу (СЕМ) ЗСУ

ІВСЕМ призначена для спостереження за параметрами екологічної обстановки, попередньої обробки отриманих даних і передачі їх в Управління екологічної безпеки та протимісної діяльності Міністерства оборони України для формування узагальнених військово-екологічних відомостей з метою розробки рекомендацій для вищого керівного складу.

ІВСЕМ складається з системи зовнішніх спостережень зони ведення бойових дій, каналів зв'язку, автоматизованої інформаційно-аналітичної системи.

Для вирішення поставлених для неї завдань ІВСЕМ повинна:

- охоплювати всі техногенно-небезпечні об'єкти;
- виявляти і вимірювати інтенсивність усіх значимих чинників ВТН, пов'язаних з бойовими діями;
- мати мінімальний час доведення інформації про виникнення критичного ВТН;
- забезпечувати допустимі похибки вимірів параметрів стану НПС з метою розпізнавання слабких, сильних і надзвичайно сильних чинників ВТН.

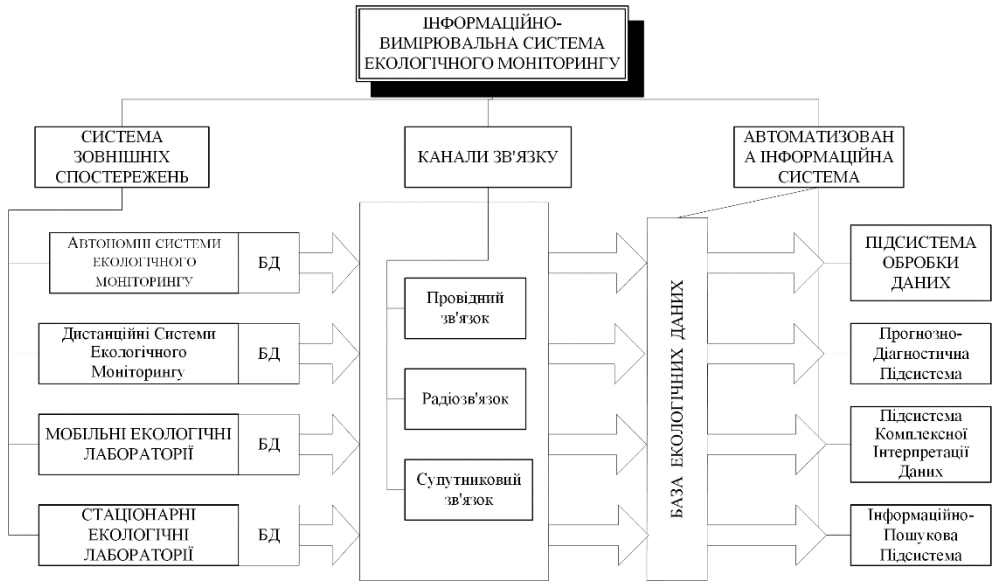


Рис. 3. Архітектура інформаційно-вимірювальної системи екологічного моніторингу [9]

Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій роблять нераціональними трудовитрати кожного конкретного користувача на розробку власних версій СУБД, ПС або прикладного програмного забезпечення, оскільки на ринку існують численні варіанти відповідних пакетів і інструментальних середовищ, що розрізняються тільки функціональністю, технікою внутрішньої реалізації і вартістю. Більшість перерахованих продуктів має внутрішні мови програмування і інструментальні засоби візуалізації інформації, імпорту/експорту даних, тому технологія створення еколого-інформаційної системи (ЕІС) зводиться до вибору найбільш відповідних програмних продуктів, їх придбання і подальшої адаптації з метою створення дійсно інтегрованої системи для ЗСУ. На сьогоднішній день однією з самих важко вирішуваних проблем при розробці інтелектуальних додатків, подібних ЕІС, є формалізація наочної області у вигляді N-мірної інформаційної моделі.

Повна архітектура ЕІС на основі ефективної концепції сховища даних показана на рис. 4.

Наведена архітектура пояснює місце і роль різних технологій обробки екологічних даних в АРМ еколога ЗСУ.

Адаптивна система екологічного моніторингу ЗСУ та визначення параметрів її функціонування у структурі НПС потребує створення єдиної інформаційно-аналітичної системи на основі розподіленої ієрархічної системи управління базами даних екологічного моніторингу районів ведення бойових дій.

Основними завданнями інформаційно-аналітичної системи є:

- облік екологічно небезпечних джерел забруднення військових об'єктів (ПНО, полігони токсичних відходів і т. ін.);
- прогнозування значень масового викиду забруднюючих речовин від потенційно небезпечних об'єктів критичної інфраструктури та джерел забруднення за відповідний період експлуатації;

- визначення фоновому стану навколишнього природного середовища на період початку моніторингу в районі розміщення військових об'єктів та ведення бойових дій;
- оцінка площі первинного та вторинного забруднення;
- складання спектрів основних забруднювачів за групами небезпеки;
- актуалізація бази даних викидів забруднюючих речовин від типових джерел забруднення;
- здійснення аналізу та прогнозування величини забруднення і соціо-еколого-економічного збитку на територіях ведення бойових дій.

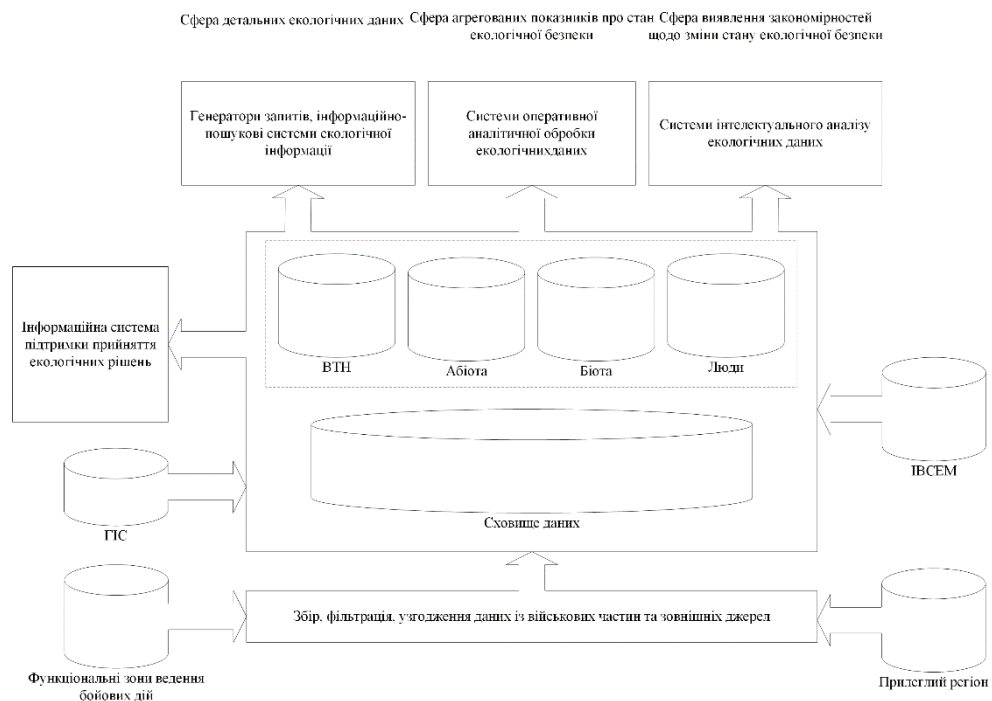


Рис. 4. Загальна архітектура ЕІС ЗСУ

Система екологічного моніторингу до зони ведення бойових дій як військової природно-техногенної геосистеми (ВПТГС) ("комплекс військових об'єктів – НПС") ґрунтується на інформаційно-аналітичній системі, що об'єднує і узагальнює розширену екологічну інформацію про стан всіх потенційно небезпечних об'єктів критичної інфраструктури та воєнно-техногенних об'єктів ЗСУ, проводить статистичний аналіз екологічного стану об'єктів, як поодиночі, так і по регіонах та в цілому за Збройні Сили, за рахунок вбудованої системи логіки та математичних процедур прогнозування дає можливість формувати запити і звіти для забезпечення своєчасного та обґрунтованого прийняття рішень з екологічних питань.

В процесі функціонування системи екологічного моніторингу поповнення баз даних проводиться безпосередньо через мережу обміну інформаційних даних відповідальними особами в сфері екологічної безпеки ЗСУ, які мають доступ до заповнення конкретної аналітичної інформації тільки відповідно до свого рівня ієрархії.

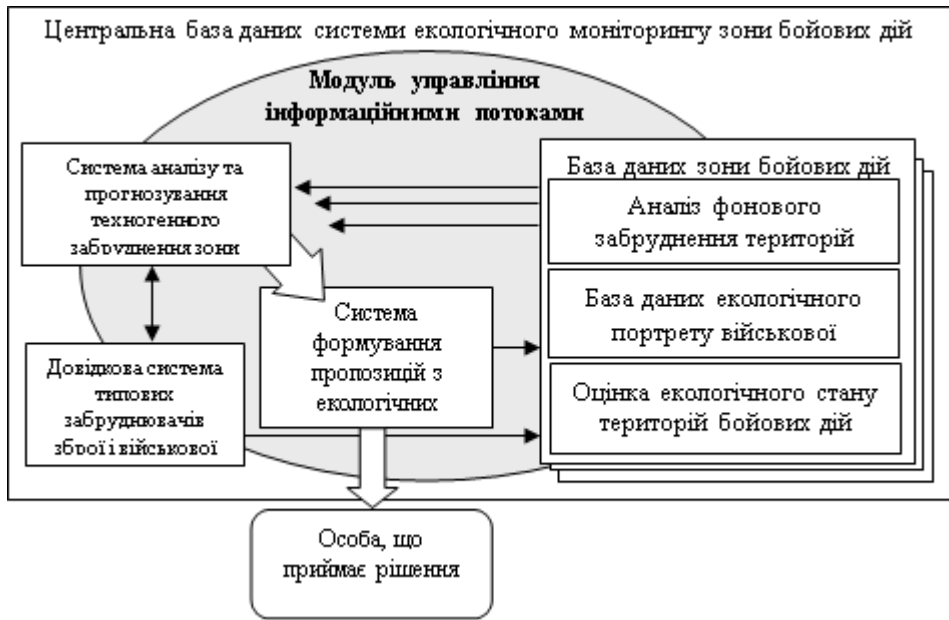


Рис. 5. Структурно-функціональна схема інформаційно-аналітичної системи екологічного моніторингу ЗСУ

Органом інформаційно-аналітичної системи екологічного моніторингу ЗСУ має бути структурний підрозділ, основними завданнями якого є:

- контроль своєчасності та повноти заповнення відповідних баз даних екологічного моніторингу, оцінка його інформаційної повноти та вірогідності;
- аналітично-статистичний супровід інформації;
- розподіл інформаційних доступів, обмежень, переадресації в системі;
- дозвіл на створення нових інформаційних ресурсів;
- направлення запитів щодо інформаційних ресурсів;
- кіберзахист інформаційних ресурсів.

Система аналізу та прогнозування техногенного та військово-техногенного забруднення – це система спеціального математичного забезпечення і логіки, яка за рахунок гнучких алгоритмів обробки інформації дозволяє отримати систематизовану інформацію про стан як окремого джерела забруднення військового об'єкта, так і загальний екологічний стан у ЗСУ за низкою параметричних чинників оцінки воєнно-техногенних впливів бойових дій на довкілля. На основі їх математичної обробки та отримання комплексних параметрів стану НПС генеруються пропозиції щодо реалізації відповідних напрямків екологічної безпеки в різних ланках управління ЗСУ.

Основними завданнями системи аналізу та прогнозування екологічного забруднення є:

- формування аналітичних вибірок за обраними критеріями та категоріями;
- вибірка вхідних даних для проведення аналітичних розрахунків;
- розрахунок ступенів забруднення певних територій вибраними зі списку групами забруднювачів;
- розрахунок комплексного показника екологічного стану ВПТГС;

- розробка за допомогою геоінформаційних систем карт екологічного забруднення територій ведення бойових дій;
- прогнозування можливого забруднення на певних територіях за визначений період часу;
- розрахунок еколого-економічного збитку на визначених територіях ведення бойових дій.

Довідкова система бази даних екологічного моніторингу ЗСУ дає можливість доступу до необхідної інформації про валові викиди забруднюючих речовин від типових військових об'єктів, доступ до аналітичних матеріалів, дозволених адміністратором системи. Основними завданнями системи є доступ до:

- інформації про екологічні властивості типових об'єктів – джерел негативних змін екологічних параметрів НПС та ВПТГС;
- довідкових даних про забруднюючі речовини;
- інформаційно-нормативних даних ГДК забруднюючих речовин;
- аналітичних даних відомчої системи екологічного моніторингу ЗСУ з урахуванням ступеня доступу відповідних користувачів;
- інформації про методики, методи та заходи зниження техногенного забруднення територій військових об'єктів;
- бази даних нормативно-правової інформації;
- розсилки нової аналітичної інформації до відповідних абонентів системи.

Система формування стандартних пропозицій, рекомендацій та рішень за рахунок алгоритмів нечіткої логіки, сформованих таблиць вихідних даних та заданих інтервалів значень для моделювання ступенів забруднень вибирає стандартно закладені пропозиції та рекомендації із бази знань. Пропозиції відпрацьовуються на базі аналітичних і експертних досліджень, з урахуванням впливу на навколишнє середовище чинників екзогенного та антропогенного характеру, класифікуються у балах. Кожній з них присвоюється свій специфічний код. В коді шифруються відповідності пропозицій до класифікаційних відношень (групи забруднювачів, агресивності забруднювачів, ступені забруднення тощо).

## **Висновки**

Для функціонування системи екологічного моніторингу необхідним є вирішення наступних завдань:

- розробка методики визначення ступеня забруднення територій від певних джерел забруднення систем зброї і військової техніки;
- законодавче визначення ступенів рівня забруднення речовинами для специфічних територій, під час бойових дій з наступним формуванням ВПТГС та загрозою критичних змін безпеки функціонування ОПН (ОКІ) та життєдіяльності населення;
- побудови алгоритмів вирішення задач прогнозування та моделювання рівня забруднення з урахуванням антропогенних та екзогенних чинників.

Для подальшого дослідження необхідно провести пошук оптимальних методів проектування складових відомчої системи екологічного моніторингу ЗСУ та її функціонального узгодження з системою державного екологічного



моніторингу, розробку експертно-моделюючих систем оцінки та прогнозування стану довкілля на територіях ведення бойових дій. Проблемною задачею є розробка методики проведення оцінки впливів на навколишнє середовище бойових дій. Ці наукові задачі потребують найбільшої уваги і термінового вирішення у галузі воєнної екології.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Довгий, С.О., Іванченко, В.В., Коржнев, М.М., Курило, М.М., Трофимчук, О.М., Чумаченко, С.М., Яковлев, Є.О., Беліцька, М.В. (2016). Асиміляційний потенціал геологічного середовища України та його оцінка. Київ: Ніка-Центр.
2. Чумаченко, С.М., Морщ, Є.В., Михайлова, А.В., Парталян, А.С. (2020). Методика комплексного оперативного експертного оцінювання військово-техногенних загроз в зоні проведення Операції об'єднаних сил, Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, 1 (9), 23-33. doi: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.23-33>.
3. Яковлев, Є., & Чумаченко, С. (2017). Екологічні загрози у Донбасі, Україна. Женева: Центр Гуманітарного Діалогу.
4. Піріков, О.В. (2013). Індикатори та системи сталого розвитку: теорія та практика. Ефективна економіка, 11, 42-51.
5. Романченко, І.С., Сбітнев, А.І., Чумаченко, С.М. (2004). Проектування бази даних для системи моніторингу навколишнього середовища в Збройних Силах України. Наука і оборона, 1, 47-53.
6. Казмірчук, В.О., Саврун, Б.Є., & Цибуля, С.А. (2015). Система екологічного забезпечення Збройних Сил України, шляхи та напрями її трансформування в систему управління екологічною безпекою. Військово-технічний збірник, (13), 120–126. doi: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.13.2015.120-126>.
7. Айдаров, И.П., Алексеев, Б.Н., Бударрагин, А.В. (2000). Военная экология. Москва: Русь-СВ.
8. Григоров, С.И., Родионов, А.С. (1994). Военная экология и экологическое обеспечение Вооруженных Сил Российской Федерации. Военная мысль, 2, 44-49.
9. Романенко, І.С., Данилюк, С.Л. (2014) Особливості концепції побудови єдиної мережі адаптивного екологічного моніторингу надзвичайних ситуацій для Збройних Сил України. ЗНП ЦНДІ ЗСУ, 1(67), 3–14.
10. Hans Lundholm, Ava Sovijärvi, Annica Waleij, Hans Flyman (2008). Environmental Guidebook for Military Operations.
11. Козуля, Т.В., Петрухін, С.Ю. (2007). Місце екологічного портрету території в інформаційному забезпеченні систем екологічного моніторингу. Вестник Херсонського національного технічного університету, 4 (27), 230-233.
12. The US Air Force Handbook. (2007).
13. Environmental Guide for Contingency Operations. (2007).
14. Hazardous Material / Hazardous Waste Management Guidance for Maneuver Units During Field and Deployment Operations. (2000). US Army Center for Health Promotion and Preventive Medicine.
15. <https://www.denix.osd.mil>.
16. US-Republic of South Africa Environmental Security Working Group Project, Guidebook on Environmental Considerations during Military Operations. (2006).

*Стаття надійшла до редакції 28.01.2022 і прийнята до друку після рецензування 31.05.2022*

## REFERENCES

1. Dovgy, S.O., Ivanchenko, V.V., Korzhnev, M.M., Kurilo, M.M., Trofimchuk, O.M., Chumachenko, S.M., Yakovlev, E.O., & Belitskaya, M.V. (2016). Assimilation potential of the geological environment of Ukraine and its assessment. Kyiv: Nika-Center [in Ukrainian].
2. Chumachenko, S.M., Morshch, E.V., Mikhailova, A.V., & Partalyan, A.S. (2020). Methods of comprehensive operational expert assessment of military-man-made threats in the area of the Joint Force Operation. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(9), 23-33. doi: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.1.23-33> [in Ukrainian].
3. Yakovlev, Ye., & Chumachenko, S. (2017). Environmental threats in Donbass, Ukraine. Geneva: Embassy of the United Kingdom and Canada, Center for Humanitarian Dialogue.
4. Pirikov, O.V. (2013). Indicators and systems of sustainable development: theory and practice. *Effective Economics*, 11, 42-51 [in Ukrainian].
5. Romanchenko, I.S., Sbitnev, A.I., & Chumachenko, S.M. (2004). Designing a database for the environmental monitoring system in the Armed Forces of Ukraine. *Science and Defense*, 1, 47-53 [in Ukrainian].
6. Kazmirchuk, V.O., Savrun, B.Y., & Tsybulia S.A. (2015). The system of ecological support of the Armed Forces of Ukraine, ways and directions of its transformation into the system of ecological safety management. *Military-Technical Collection*, (13), 120-126. doi: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.13.2015.120-126> [in Ukrainian].
7. Aidarov, I.P., Alekseev, B.N., & Budaragin, A.V. (2000). Military ecology. Moscow: Rus-SV [in Russian].
8. Grigorov, S.I., & Rodionov, A.S. (1994). Military ecology and ecological support of the Armed Forces of the Russian Federation. *Military Thought*, 2, 44-49 [in Russian].
9. Romanenko, I.S., & Danilyuk, S.L. (2014). Features of the concept of building a single network of adaptive environmental monitoring of emergencies for the Armed Forces of Ukraine. *ZNP CNDI ZSU*, 1(67), 3-14 [in Ukrainian].
10. Lundholm, H., Sovijärvi, A., Waleij, A., & Flyman, H. (2008). Environmental Guidebook for Military Operations.
11. Kozulya, T.V., & Petrukhin, S.Yu. (2007). The place of ecological portrait of the territory in the information support of ecological monitoring systems. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 4(27), 230-233 [in Ukrainian].
12. The US Air Force Handbook. (2007).
13. Environmental Guide for Contingency Operations. (2007).
14. Hazardous Material / Hazardous Waste Management Guidance for Maneuver Units During Field and Deployment Operations. (2000). US Army Center for Health Promotion and Preventive Medicine.
15. Retrieved from: <https://www.denix.osd.mil>.
16. US-Republic of South Africa Environmental Security Working Group Project, Guidebook on Environmental Considerations during Military Operations. (2006).

*The article was received 28.01.2022 and was accepted after revision 31.05.2022*

### **Чумаченко Сергій Миколайович**

доктор технічних наук, с.н.с., завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій

Адреса робоча: 01601 Україна, м. Київ, вул. Володимирська, 68

ORCID ID: 0000-0002-8894-4262 *e-mail*: [sergiy23.chumachenko@gmail.com](mailto:sergiy23.chumachenko@gmail.com)

### **Яковлев Євгеній Олександрович**

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

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

ORCID ID: 0000-0001-6934-618X *e-mail*: [yakovlevhydro@gmail.com](mailto:yakovlevhydro@gmail.com)

**Пиріков Олексій Валерійович**

кандидат технічних наук, доцент, експерт ГО «Фундація розвитку екологічних та енергетичних ринків»

**Адреса робоча:** 79019 Україна, м. Львів, вул. Липинського, 36

ORCID ID: 0000-0002-7077-3645 **e-mail:** 0506463222av@gmail.com

**Паргальян Андрій Сергійович**

кандидат технічних наук, заступник начальника відділу екологічної безпеки та цивільного захисту Міністерство оборони України

**Адреса робоча:** 03168 Україна, м. Київ-168, Повітрофлотський проспект, 6

ORCID ID: 0000-0001-7149-8975 **e-mail:** partandrej@gmail.com

УДК 681.5.01: 629.52.7

**Vasyl M. Trysnyuk**, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher  
ORCID ID: 0000-0001-9920-4879 *e-mail*: trysnyuk@ukr.net

**Viktor O. Shumeyko**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
ORCID ID: 0000-0002-0285-4566 *e-mail*: shum1983@ukr.net

**Taras V. Trysnyuk**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
ORCID ID: 0000-0002-3672-8242 *e-mail*: taras24t@gmail.com

**Vasyl M. Marushchak**, postgraduate  
ORCID ID: 0000-0002-6935-9949 *e-mail*: stydjaga.fo.ru@gmail.com

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

## **MONITORING OF RADIOACTIVE POLLUTION OF THE SITE AND ELIMINATION OF THE CONSEQUENCES OF NATURAL AND TECHNOGENIC DISASTERS**

***Abstract.** The article proposes an urgent task to increase the level of environmental safety of radioactively contaminated areas. The main tasks are to develop new methods of environmental monitoring; study of migration processes of radioactive elements in the soil cover in order to develop predictive models for timely identification of areas at risk of contamination; establishing the relationships between the state of soil contamination by radionuclides and their genesis and identifying patterns of pollutant distribution in the study environment. The urgency of the topic is due to the requirements of advanced automated systems for monitoring the radiation situation and ACS to reduce the processing time of data on radioactive contamination of the area and increase the reliability of the results of radiation detection. The aim of the work is to separate the tasks that are allocated in the development of a unified system of methods and algorithms for processing information about radioactive contamination in automated radiation monitoring systems, dangerous in terms of radiation. The paper formulates the problem of eliminating the consequences of natural and man-made disasters in Ukraine. The analysis of problems of management of technogenic safety where the emergency situation is fixed is carried out. A formal description of the studied system and its environment is obtained, based on the principles of the systems approach. The classification of sources of emergencies based on the causes, different types of objects of damage depending on the nature of behavior in extreme conditions, different types of protection resources that implement the necessary protective measures. The direct and inverse problems of finding the optimal plan are considered. The selection of objects for a direct task is carried out in order according to their priority. When solving the inverse problem, the selection of objects is carried out until the specified level of system effect, which accumulates in the selection process. Information on sources of radioactive contamination and meteorological information are used in forecasting.*

***Key words:** natural disasters; man-made disasters; target efficiency*

В.М. Триснюк, В.О. Шумейко, Т.В. Триснюк, В.М. Марущак

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

## МОНІТОРИНГ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ МІСЦЕВОСТІ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ ПРИРОДНИХ ТА ТЕХНОГЕННИХ КАТАСТРОФ

***Анотація.** У статті запропоновано актуальне завдання підвищення рівня екологічної безпеки радіоактивно забрудненої місцевості. Основні завдання полягають у розробленні нових методів екологічного моніторингу; дослідженні процесів міграції радіоактивних елементів у ґрунтовому покриві з метою розроблення прогностичних моделей для своєчасного виявлення територій, які перебувають у зоні ризику забруднення; встановленні залежностей між станом забруднення ґрунтів радіонуклідами та їх генезисом і виявленні закономірностей поширення полутанта у досліджуваному середовищі. Актуальність теми обумовлена вимогами перспективних автоматизованих систем контролю радіаційної обстановки і АСУ по скороченню часу обробки даних про радіоактивне забруднення місцевості і підвищенню достовірності результатів виявлення радіаційної обстановки. Мета роботи полягає в розділенні завдань, які виділяються при розробці єдиної системи методик і алгоритму обробки інформації про радіоактивне забруднення місцевості в автоматизованих системах контролю радіаційної обстановки. В процесі досліджень вдосконалено методику формування оцифрованого зображення поля радіоактивного забруднення місцевості, що використовується для відображення зон забруднення, виявлення районів, небезпечних в радіаційному відношенні. У роботі сформульована постановка задачі ліквідації наслідків природних та техногенних катастроф на території України. Проведений аналіз проблем управління техногенною безпекою на території, де зафіксована надзвичайна ситуація. Отриманий формальний опис досліджуваної системи і оточуючого її середовища, виходячи із принципів системного підходу. Наведена класифікація джерел надзвичайних ситуацій, виходячи із причин виникнення, різних видів об'єктів ураження в залежності від характеру поведінки в екстремальних умовах, різних видів ресурсів захисту, які реалізують необхідні захисні заходи. Розглянуті пряма та обернена задачі пошуку оптимального плану. Відбір об'єктів для прямої задачі проводиться у відповідності до їхньої пріоритетності. При вирішенні оберненої задачі відбір об'єктів проводиться до досягнення заданого рівня системного ефекту, що накопичується в процесі відбору. При прогнозуванні використовуються зведення про джерела радіоактивного забруднення і метеорологічна інформація.*

***Ключові слова:** природні катастрофи; техногенні катастрофи; цільова ефективність*

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.35-46>

### Вступ

Питання безперервного контролю радіаційної обстановки (РО) і своєчасного виявлення радіоактивного забруднення місцевості (РЗМ) продовжують залишатися актуальними і нині. Це обумовлено двома чинниками: збільшенням кількості об'єктів ядерної енергетики, як джерела дешевшої енергії, і активізацією сил міжнародного екстремізму, що здійснюють масовані

терористичні акти по всьому світу. У разі загострення міжнародного стану не можна унеможливити масову атаку терористів на об'єкти атомної енергетики, підприємства ядерного паливного циклу, а також могильники радіоактивних відходів. Як показує практика, превентивні заходи захисту не завжди виявляються ефективними. Таким чином, можливе виникнення ситуації, коли значні території зазнають радіоактивного забруднення одночасно від декількох джерел. Виявлення радіоактивного забруднення місцевості буде першим завданням ліквідації наслідків подібних ситуацій.

Нині виявлення РЗМ може здійснюватися за допомогою прогнозу і на основі фактичних даних радіаційної розвідки і спостереження [1].

При прогнозуванні використовуються зведення про джерела радіоактивного забруднення і метеорологічна інформація. Цей процес досить добре формалізований і його практична реалізація не представляє великих труднощів в автоматизованих системах контролю радіаційної обстановки (АСКРО). Проте достовірність подібного прогнозу залежатиме від відповідності вживаної математичної моделі цій конкретній аварії і від точності початкових даних. Як показує практика, дані прогнозу не завжди задовільно відповідають реальній радіаційній обстановці.

Чинними керівними документами пропонується обов'язкове уточнення прогнозу даними розвідки. Проте нині відсутнє практично реалізоване програмне забезпечення для автоматизованих систем контролю радіаційної обстановки і АСУ, що дозволяють комплексно вирішувати задачу щодо виявлення і оцінки радіаційної обстановки. В першу чергу це стосується ситуацій, коли щільність точок контролю нижча нормативної. На сучасному рівні ефективно вирішувати такі завдання можна тільки спираючись на експертні системи, що будуються на базі сучасних програмно-обчислювальних комплексів, які дозволяють прогнозувати поведінку об'єктів, що вивчаються, в реальному режимі часу. Такі комплекси, як правило, створюються на базі робочих комп'ютерних станцій з розгалуженим призначенням для користувача інтерфейсом вхідних і вихідних даних. Неодмінною умовою успішної роботи комплексів є їх реальне наповнення початковими даними до моменту їх активації і далі протягом аварії. Найбільш сучасною і ефективною для вирішення цього завдання на об'єктовому рівні являється інформаційно-вимірвальна система (ІВС) «Кільце», яка є складовою частиною системи радіаційного контролю (СРК) на АЕС і призначена для безперервного контролю радіаційної обстановки. У 2001 році закінчена дослідна експлуатація цієї системи, а з 2002 року вона прийнята на озброєння Запорізькою АЕС.

У разі виявлення радіоактивного забруднення місцевості за фактичними даними через відсутність практично реалізованого програмного забезпечення для цих систем можна говорити лише про певні наукові опрацювання завдання. Деякі з причин такого стану справ очевидні. Це невідповідність, тою чи іншою мірою, між фактичним РЗМ і модельним, неповна і неточна інформація про джерела радіоактивного забруднення, значні помилки визначення потужності дози випромінювання (ПДВ) приладами радіаційної розвідки, великий об'єм оброблюваних даних, що мають розкид за часом вимірів, і так далі.

Наявне математичне забезпечення для обробки інформації про РЗМ в автоматизованих системах контролю РО, на наш погляд, має істотний недолік.

Апарат оцінки РЗМ в АСКРО створювався після аварії на Чорнобильській АЕС і тому значною мірою орієнтований на специфіку завдань, що вирішуються в системах контролю радіаційної обстановки.

Різні за цільовим призначенням автоматизовані системи управління [2], контролю РО [3] і Єдина автоматизована система виявлення і оцінки масштабів і наслідків застосування зброї масового ураження [2] передбачають обробку даних про РЗМ і відповідну інформаційну взаємодію. У зв'язку з цим, математичне і програмне забезпечення обробки інформації про РЗМ в цих системах повинні були розроблятися на єдиній концепції, що забезпечує тотожність отримуваних результатів. На жаль, цього не сталося.

Таким чином, виникає нове наукове завдання розробки методик і алгоритмів обробки даних про РЗМ в АСКРО і АСУ при малій щільності точок контролю.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Питання про необхідну щільність точок контролю радіаційної обстановки заслуговує окремого розгляду. Так, дослідження, проведені в [3], показали, що оптимальний об'єм інформації про фактичну радіаційну обстановку (РО) забезпечується за наявності одного виміру на 3–6 кв. км на регіональному рівні і на 25–30 кв. км – в державних органах управління. Ці дослідження проводилися на базі тих, що повністю відповідають модельним, і не враховували погрішності роботи датчиків. Інші дослідження в цій області [3], проведені вже з урахуванням помилок виміру ПДВ, показали, що на регіональному рівні необхідна щільність складе 2,3–2,9 кв. км, а в масштабі держави – 3,2–4,0 кв. км на одну точку.

Нині прийнято [4], що при веденні радіаційної розвідки один вимір повинен проводитися на площі 3–6 кв. км. Слід зазначити, що визначення необхідної щільності точок контролю проводилося з розрахунку на використання методу інтерполяції. Застосування інших методів [4] для відновлення характеристик радіаційного поля, топологія якого близька до модельного, показало можливість виявлення фактичного РЗМ за наявності одного виміру на 10 кв. км. До таких методів відноситься метод лінійної оптимальної інтерполяції (МЛОІ), що дозволяє підвищувати достовірність інформації в процесі обробки.

Нині досить добре опрацювали методи прогнозування радіоактивного забруднення місцевості при ядерних вибухах. Проте, ці підходи неприйнятні при виникненні надзвичайних ситуацій на об'єктах атомної енергетики і підприємствах ядерного паливного циклу. Це пов'язано з тим, що набір радіонуклідів, які забруднюють навколишній простір при аварії на АЕС, істотно відрізнятиметься від їх складу при ядерному вибуху. Так, при аварії ядерного енергетичного реактора довгоживучих радіонуклідів буде в 100–2200 разів більше, ніж при використанні ядерної зброї [5]. Крім того, принципово іншим буде процес поширення продуктів реакції. Це обумовлено:

- різною висотою підйому радіоактивних хмар з аварійного реактора і від ядерного вибуху;
- пульсуючим характером витікання радіоактивних речовин із зруйнованої зони ядерного реактора;

– нестабільністю метеопараметрів в приземному (пограничному) шарі атмосфери в порівнянні з високими шарами атмосфери, де відбувається поширення радіоактивної хмари ядерного вибуху.

З огляду на вищесказане, можна зробити висновок про те, що методики прогнозування радіоактивного забруднення місцевості, які базуються на використанні модельних уявлень про формування сліду ядерного вибуху, непридатні відносно радіаційних аварій, або вимагають істотної переробки. Інші методики, при обробці інформації про аварії на ядерних енергетичних установках, повинні враховувати радіонуклідний склад продуктів реакції. Крім того, застосування коефіцієнта спаду ПДВ, використовуваного для ядерних вибухів, в даному випадку неприпустимо.

Основними завданнями вимірювального моніторингу навколо АЕС є [5]:

- спостереження за рівнями радіоактивного забруднення довкілля;
- оцінка рівнів радіоактивного забруднення з метою попередження можливих негативних наслідків;
- вивчення тенденцій просторово-часових змін радіаційної обстановки;
- прогноз радіоактивного забруднення об'єктів довкілля;
- розробка рекомендацій щодо дії на джерела радіоактивного забруднення на основі інформації, отриманої в результаті виконання попередніх завдань.

Деякі АЕС частково обладнані датчиками, які, досягши потужності дози гамма-випромінювання порогового значення, автоматично включають прилади, що вимірюють сумарну активність ізотопів йоду, інертних радіоактивних газів (ІРГ) і потужність дози бета-випромінювання. Отримана таким чином інформація передається по дротяних засобах зв'язку. Оснащення потенційно небезпечних в радіаційному відношенні об'єктів приладами, що дозволяють вимірювати активність окремих ізотопів (груп ізотопів), викликано тим, що різні радіонукліди представляють різну небезпеку для життя і здоров'я людини.

Датчики розташовуються, в основному, рівномірно навколо АЕС, з деякою перевагою у напрямі пануючих вітрів і великих міст (селищ). З навітряного боку від АЕС на відстані 40–60 км від неї встановлюють контрольний дозиметричний пост, вважають, що він реєструє тільки природний фон.

Модель поширення радіоактивної хмари в пограничному шарі атмосфери дозволяє розрахувати потужність дози випромінювання на сліді радіоактивної хмари при аварії ядерного реактора. В основу моделі покладені наступні залежності.

$$\dot{X}_1 = \frac{(1 - 0.9\tau^{-0.18})W_{\text{эл}}\eta R}{V^{\beta} X^{\gamma}} K \exp\left(-\frac{Y^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (1)$$

де  $\dot{X}_1$  – потужність дози випромінювання на сліді радіоактивної хмари за годину після аварії на АЕС, Р/ч;

$\tau$  – тривалість компанії, доба. Стандартна компанія ядерних реакторів РБМК і ВВЕР на території України близько трьох років або 1100 діб;

$W_{\text{эл}}$  – електрична потужність ядерного реактора, МВт;

$\eta$  – доля викиду радіоактивних речовин з ядерного реактора, %. Якщо доля викиду невідома (типова ситуація в початковій стадії аварії), то вона



приймається рівною 10%, причому для ядерних реакторів РБМК 25% викиду вважається хмарою, а 75% викиду – струмись. Для ядерних реакторів ВВЕР 75% викиду – хмара і 25% – струмись;

R – коефіцієнт, величина якого залежить від типу ядерного реактора і категорії стійкості атмосфери. Значення R наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта R

Тип ядерного реактора	Категорія стійкості атмосфери		
	Конвекція (A)	Ізотермія (D)	Інверсія (F)
РБМК	0,01104	0,11435	0,17282
ВВЕР	0,00644	0,01421	0,03044

V – швидкість вітру в шарі 0–200 м, м/с;

X – відстань від аварійного ядерного реактора по напрямку вітру, км;

K – коефіцієнт, що враховує зменшення потужності дози на початковій ділянці сліду

$$K = 0.5 \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \sqrt{K_1} \ln(X/X_{50}) \right) \right] \quad (2)$$

Для категорії стійкості атмосфери A і D  $K = 1$ , але його величину необхідно враховувати для категорії стійкості атмосфери F;

$\operatorname{erf} \left( \sqrt{K_1} \ln(X/X_{50}) \right)$  – інтеграл вірогідності (функція Лапласа);

$X_{50}$  – відстань від АЕС до точки, в якій потужність дози випромінювання в два рази менше максимальної на осі сліду, км;

Y – відстань точки від осі сліду, км;

$\sigma_y$  – дисперсія бічного відхилення сліду на відстані X км від АЕС

$$\sigma_y = \frac{C_3 X}{\sqrt{1 + 0.1X}} \quad (3)$$

де  $C_3$  – критерій Пасквілла, величина якого залежить від категорії стійкості атмосфери.

Військові джерела пов'язані з використанням засобів збройного протиборства під час прикордонних конфліктів і в локальних війнах, а також у стратегічних планах глобальної конфронтації. Серед цих засобів розрізняються такі:

- звичайна і високоточна зброя;
- боєприпаси об'ємного вибуху, запальні, фугасні, осколкові, кулькові, кумулятивні і бетонобійні;
- ядерна зброя;
- хімічна зброя;
- бактеріологічна зброя.

У загальному випадку можливий взаємозумовлений комбінований прояв різних джерел безпеки.

За несприятливими наслідками розрізняються НС, що призводять до людських жертв, збитків господарським об'єктам та ураження природного

середовища. Залежно від характеру поведінки в екстремальних умовах спостерігаються різні види об'єктів ураження.

Серед населення розрізняються:

- непрацездатні, включаючи дітей, старих і тяжкохворих;
- працівники виробничої сфери;
- працівники сфери послуг;
- невоєнізовані формування;
- воєнізовані формування (Збройні сили України, Національна гвардія України, Прикордонна служба України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій).

Серед господарських об'єктів можна виділити такі:

- об'єкти критичної інфраструктури;
- об'єкти виробничої сфери;
- об'єкти сфери послуг;
- історико-культурні цінності;
- науково-технічну документацію;
- коштовне технологічне обладнання.

У природному середовищі вирізняються:

- представники тваринного світу (фауна);
- представники рослинного світу (флора);
- водні джерела;
- корисні копалини;
- заповідні зони.

За протидіючими чинниками розрізняються НС, що спричиняють використання різних видів ресурсів захисту, які реалізують необхідні захисні заходи.

Розвідувально-контролюючі ресурси призначені для ведення розвідки і контролю за станом і зміною обстановки в зонах можливого чи реального прояву уражаючих впливів за допомогою військових формувань:

- інженерної розвідки для виявлення меж і ступеня руйнування житлових будинків і виробничих споруд, визначення вторинних наслідків уражаючих впливів, знаходження місць перебування потерпілих і підходів до них;
- хімічної розвідки для виявлення меж хімічного зараження, визначення концентрації отруйних речовин і напрямку поширення зараженого повітря, спостереження і лабораторного контролю за зміною хімічної обстановки;
- радіаційної розвідки для виявлення меж і рівнів радіоактивного забруднення, встановлення режимів радіаційного захисту, спостереження і дозиметричного контролю за зміною радіаційної обстановки;
- медичної розвідки для виявлення постраждалих людей, визначення їхнього стану й умов надання першої медичної і лікарської допомоги;
- ветеринарної та агротехнічної розвідки для виявлення постраждалих тварин і рослин, визначення їхнього стану й умов надання ветеринарної й агротехнічної допомоги.

Інженерно-технічні ресурси спрямовані на зменшення збитків господарським об'єктам (захист техносфери) за допомогою формувань:

- інженерного захисту для підвищення фізичної стійкості виробничих споруд і житлових будинків, будівництва й обслуговування захисних споруд, розчищення проходів і розбирання завалів, облаштування під'їзних шляхів і маршрутів евакуації;

- хімічного захисту для забезпечення населення індивідуальними засобами захисту, локалізації вогнищ викиду й обваловки місць розливу отруйних речовин, дегазації прилягаючої місцевості, приміщень, устаткування, одягу і продуктів харчування;

- радіаційного захисту для забезпечення населення протирадіаційними сховищами, організації йодної профілактики, збору і поховання небезпечних радіоактивних осколків, дезактивації прилягаючої місцевості;

- пожежного захисту для забезпечення господарських об'єктів засобами автоматичної сигналізації і пожежогасіння, локалізації і ліквідації пожеж у житлових будинках і виробничих спорудах, боротьби з лісовими, степовими, торф'яними і підземними пожежами;

- технічного захисту для підвищення безпеки технологічного обладнання за допомогою засобів автоматичного контролю і відключення, виконання профілактичних і ремонтно-відновлювальних робіт на комунально-енергетичних мережах, а також для ремонту транспортної, інженерної, протипожежної та іншої техніки.

Медико-біологічні ресурси спрямовані на зменшення негативних наслідків для населення, тварин і рослин (захист біосфери) за допомогою формувань:

- медичного захисту для надання першої медичної і лікарської допомоги постраждалим безпосередньо в зонах ураження, посадки їх на транспорт і супроводу під час евакуації;

- лікарського захисту для надання спеціалізованої медичної допомоги і стаціонарного лікування потерпілих за межами зон ураження в клініках, лікарнях і шпиталях;

- епідеміологічного захисту для санітарного очищення зон ураження, профілактики і лікування інфекційних захворювань;

- ветеринарного захисту для санітарної обробки і лікування тварин, локалізації і ліквідації епізоотій;

- агротехнічного захисту для знезаражування рослин і фуражу, локалізації і ліквідації епіфітотій.

Транспортно-комунікаційні ресурси забезпечують переміщення об'єктів біо- і техносфери усередині і поза зонами ураження за допомогою різних видів транспорту і засобів зв'язку. Для цього залучаються формування:

- забезпечення евакуації потерпілих;

- забезпечення передислокації формувань;

- забезпечення підвозу матеріально-технічних засобів;

- забезпечення підвозу води, продуктів харчування і предметів першої необхідності;

- забезпечення евакуації унікального обладнання і культурних цінностей.

Матеріально-продовольчі ресурси забезпечують процеси виконання захисних заходів необхідними матеріалами і засобами за допомогою формувань:

- матеріального забезпечення для зберігання і розподілення будівельних, дегазаційних, медичних та інших матеріалів і засобів;

- енергозабезпечення для заправлення транспорту горючо-мастильними матеріалами, підзарядки і заміни акумуляторних батарей, організації автономного електроживлення;

- речового забезпечення для зберігання і розподілення спецодягу серед особового складу формувань і предметів першої необхідності серед евакуйованого населення;

- комунального забезпечення для розселення і комунально-побутового обслуговування евакуйованого населення;
- продовольчого забезпечення для зберігання і розподілення продуктів харчування серед формувань і населення.

При пошуку оптимального плану застосування сил і засобів системи техногенної безпеки на етапі ліквідації наслідків НС доцільно використовувати програмно-цільовий підхід до планування. Початковим етапом циклу планування є розробка мети програми (цілепокладання). Головною системною метою програми робіт з ліквідації наслідків НС вважаємо підвищення їхньої цільової ефективності. Першим показником ефективності є  $F$  – значення очікуваного системного ефекту (зменшення збитку від наслідків НС) програми робіт з ліквідації наслідків НС. Другим показником ефективності програми треба вважати витрати бюджетних ресурсів  $B$ , якими досягнуто значення першого показника. Тоді ефективність цільової програми оцінюється як

$$e_{\text{öi}} = F/B . \quad (4)$$

Постановка задачі розробки оптимальної програми робіт з ліквідації наслідків НС: на множині планів використання бюджетних ресурсів  $\mathfrak{R} = \{R_i\}$ , де кожний з елементів  $R_i$  задовольняє системі обмежень на застосування ресурсів (тобто належить області припустимих рішень):

$$G(R_i) < G_O , \quad (5)$$

знайти такий (оптимальний) план  $R_O$ , що максимізує ефективність програми

$$e_{\text{öi}}(R_O) = \frac{F(R_O)}{B(R_O)} = \max e_{\text{öi}} . \quad (6)$$

Побудуємо область припустимих рішень на Парето-функції системи (рис. 1).

На рис. 1 позначено:  $BS$  – бюджетні витрати на програму,  $FS$  – цільовий ефект, що досягнуто витратами  $BS$ . Природно, що існує множина можливих планів  $\mathfrak{R}$ , кожний з елементів котрої представляється точкою з координатами  $R(F, B)$ .

Очевидно, що для кожної точки області припустимих рішень  $F$  планом  $R$  цілком визначається рівень використання ресурсів  $B$ . Множина "ефективних" планів, для котрих співвідношення  $(F/B)$  є найкращим, – ліва верхня межа області припустимих планів, бо кожний ефективний план переважає за  $F$  рівноцінні йому плани за  $B$  або поступається за  $B$  рівноцінним планам за  $F$ .

Множина ефективних планів складає множину Парето, що утворює функцію Парето  $F(B)$ .

Оскільки прагнення підвищення ефективності системи обмежується точкою  $R^{mp}(F^{\max}, B^{\max})$  як планом "абсолютної досконалості" системи, то потрібних для цього бюджетних коштів  $B^{\max}$  може не вистачити і треба трохи "поступитися" цільовим ефектом  $F$ .

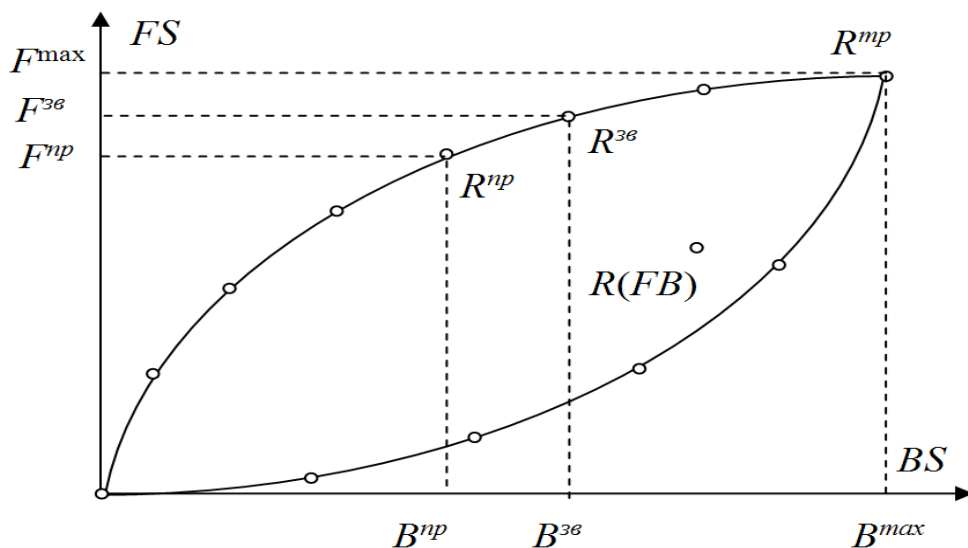


Рис. 1. Область припустимих рішень на Парето-функції системи

Якщо можливі витрати  $B^{np}$ , то їм відповідає значення Парето-функції  $F^{np}$ , що є результатом вирішення "прямої" задачі оптимального планування використання обмежених ресурсів, що максимізує ефект.

Якщо значення  $F^{np}$  не задовольняє і його можна підвищити до  $F^{ze}$ , то новому  $F^{ze}$  відповідає нове значення витрат бюджету  $B^{ze}$ , що є результатом вирішення "оберненої" задачі оптимального використання ресурсів, що мінімізує потрібний бюджет. Такий підхід визначає компромісний рівень цільового ефекту програми і бюджет для його досягнення.

## Висновки

У статті сформульована постановка задачі ліквідації наслідків природних та техногенних катастроф на території України. Проведений аналіз проблем управління техногенною безпекою конкретного регіону, де зафіксована надзвичайна ситуація. Отриманий формальний опис досліджуваної системи і оточуючого її середовища, виходячи із принципів системного підходу.

Наведена класифікація джерел надзвичайних ситуацій, виходячи із причин виникнення, різних видів об'єктів ураження в залежності від характеру поведінки в екстремальних умовах, різних видів ресурсів захисту, які реалізують необхідні захисні заходи. Для пошуку оптимального плану застосування сил і засобів системи техногенної безпеки на етапі ліквідації наслідків НС використаний програмно-цільовий підхід до планування з використанням Парето-функції системи.

Розглянуті пряма та обернена задачі пошуку оптимального плану. Відбір об'єктів для прямої задачі проводиться у відповідності до їхньої пріоритетності (рангу). При вирішенні оберненої задачі відбір об'єктів проводиться до досягнення заданого рівня системного ефекту, що накопичується в процесі відбору.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018. С. 61–67.*
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. [2013] Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling.* – Springer, Berlin, Heidelberg. 347–352.
3. Адаменко О.М. Екологічна безпека територій. Монографія / О.М. Адаменко, Я.О. Адаменко, Л.М. Архіпова та ін. – Івано-Франківськ : Супрун, 2014. – 456 с.
4. Триснюк В.М. Система управління екологічною безпекою природних і антропогенно-модифікованих геосистем. Системи обробки інформації. – 2016. – №12. – С. 185–188.
5. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., Radlowska, K.O. [2019] Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.

*Стаття надійшла до редакції 18.02.2022 і прийнята до друку після рецензування 30.05.2022*

## REFERENCES

1. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare*, 1, 61-67.
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. In *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347-352). Springer, Berlin, Heidelberg.
3. Adamenko, O.M., Adamenko, Ya.O., Arkhipova, L.M. et al. (2014). Ecological safety of territories. Ivano-Frankivsk: Suprun.
4. Trysnyuk, V.M. (2016). Environmental safety management system of natural and anthropogenically modified geosystems. *Information processing systems*, 12, 185-188.
5. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., Radlowska, K.O. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, Extended Abstracts.

*The article was received 18.02.2022 and was accepted after revision 30.05.2022*

### **Триснюк Василь Миколайович**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

**ORCID ID:** 0000-0001-9920-4879 **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

### **Шумейко Віктор Олександрович**

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

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

**ORCID ID:** 0000-0002-0285-4566 **e-mail:** shum1983@ukr.net

**Триснюк Тарас Васильович**

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

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

ORCID ID: 0000-0002-3672-8242 *e-mail:* taras24t@gmail.com

**Марущак Василь Миколайович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: 0000-0002-6935-9949 *e-mail:* stydjaga.fo.ru@gmail.com

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

УДК 538.69.331.45

**Volodymyr Zdanovsky**, Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8303-4254> **e-mail:** [zdanovsky\\_volodymyr@ukr.net](mailto:zdanovsky_volodymyr@ukr.net)

**Valentin Glyva**, Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1257-3351> **e-mail:** [glyva.valentin@gmail.com](mailto:glyva.valentin@gmail.com)

**Nataiia Burdeina**, PhD, Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2812-1387> **e-mail:** [burdeina.nb@knuba.edu.ua](mailto:burdeina.nb@knuba.edu.ua)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

### MAIN TASKS OF IMPLEMENTATION OF INTERNATIONAL LABOR PROTECTION REGULATIONS IN THE LEGAL FIELD OF UKRAINE

**Abstract.** *The paper analyzes the legislative regulation in the field of labor protection in Ukraine and identifies the main directions of work to improve it. In connection with Ukraine's move towards EU membership, it is advisable to focus on EU regulations. It is shown that such acts are both general in nature and consider certain aspects of labor protection (certain factors of harmful effects). The advantage of the European directives on occupational safety is that they contain mandatory annexes that quantify the permissible harmful effects. The joint work of experts of the EU and the International Labor Organization on the draft Law of Ukraine on labor protection is analyzed. Due to a number of shortcomings, these materials are generally in line with the international level and require minimal harmonization with current national regulations. The advantage of the Project is a clear modern definition of "employee" and "employer". The same applies to the definition of the rights and responsibilities of employees and employers. For the first time in Ukraine, a risk-based approach to possible dangers for workers has been recognized at the legislative level. It is advisable to detail its requirements in bylaws for certain industries, taking into account the significant achievements of domestic scientists. This need is due to the lack of clearly defined methods of calculating occupational risks. The advantage of the Project is also targeted regulation of penalties for non-compliance with the Law. The implementation of the law, with some modifications, will contribute to the safety and health of workers.*

**Key words:** *labor protection; health of workers; employee; employer; risk-oriented approach*



В.Г. Здановський, В.А. Глива, Н.Б. Бурдейна

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

## ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ НОРМАТИВІВ З ОХОРОНИ ПРАЦІ У ПРАВОВЕ ПОЛЕ УКРАЇНИ

***Анотація.** У роботі проаналізовано законодавче нормування у галузі охорони праці в Україні і визначено основні напрями робіт щодо його вдосконалення. У зв'язку з рухом України до членства у Євросоюзі доцільним є орієнтація на нормативні акти ЄС. Показано, що такі акти мають як загальний характер, так і розглядають окремі аспекти охорони праці (окремі фактори шкідливого впливу). Перевагою загальноєвропейських директив з безпеки працюючих є те, що вони містять обов'язкові додатки, які надають кількісні значення допустимих шкідливих впливів. Проаналізовано спільні напрацювання фахівців ЄС та Міжнародної організації праці щодо проєкту Закону України з питань охорони праці. За низки недоліків, ці матеріали у цілому відповідають міжнародному рівню і потребують мінімальної гармонізації з чинними національними нормативами. Перевагою Проєкту є чітке сучасне визначення поняття «працівник» та «роботодавець», що на сьогоднішній день в Україні має різночитання і у багатьох випадках є предметом юридичних процедур. Це ж стосується визначення прав і обов'язків працівників і роботодавців. Уперше в Україні на законодавчому рівні визнано ризик-орієнтований підхід щодо можливих небезпек для працюючих. Доцільно деталізувати його вимоги у підзаконних актах для окремих галузей промисловості з урахуванням значних напрацювань вітчизняних науковців. Така потреба обумовлена відсутністю чітко визначених методик розрахунків професійних ризиків. Перевагою Проєкту є також орієнтована регламентація покарань за невиконання вимог Закону. Впровадження закону за деякими доопрацюваннями сприятиме безпеці та збереженню здоров'я працюючих.*

***Ключові слова:** охорона праці; здоров'я працюючих; працівник; роботодавець; ризик-орієнтований підхід*

**DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.47-58>**

### Вступ

Закон України «Про охорону праці», прийнятий у 1993 р., тобто майже 30 років тому, у значній мірі застарів як по формі, так і по суті, та не відповідає сучасному баченню теорії і практики безпеки праці. Про це свідчать численні наукові дослідження та публікації, а також висновки та рішення компетентних державних органів.

У зв'язку з просуванням України до членства у ЄС, при розробці і впровадженні нормативних актів з охорони праці доцільно керуватися офіційними документами Євросоюзу з цієї проблематики. Це потребує ретельного аналізу стану питання і розроблення цілісної концепції національної політики у сфері охорони праці.

## Аналіз нормативних джерел

Концепція щодо стратегічних задач ЄС у галузі захисту здоров'я працівників та безпеки праці міститься у документі, представленому до відповідних установ Євросоюзу [1]. Він висвітлює стратегічні задачі і напрями діяльності у галузі охорони праці. У зв'язку з різноманітністю можливих несприятливих впливів на працюючих, існує низка Директив ЄС, які регламентують окремі впливи, наприклад [2–5].

Загальновизнаний міжнародний норматив [6] містить вимоги до усіх фізичних та хімічних чинників середовища. На сьогоднішній день в Україні розроблено сучасний підхід до визначення ризиків у процесі виробничої діяльності [7]. Ризик-орієнтований підхід у сфері охорони праці є обов'язковою складовою будь-якого нормативного документа у галузі цивільної безпеки. Це треба урахувати у процесі підготовки національних нормативних актів. Напрацювання у цьому напрямі потребують ретельного аналізу і визначення пріоритетів та головних складових, які можуть бути внесені у відповідний Закон України.

## Виклад основного матеріалу

Проектом Закону «Про безпеку та здоров'я працівників» (далі – Проект), створеного у співдружності представниками ЄС та Міжнародною організацією праці (МОП), пропонується взяти його за основу для створення відповідного законопроекту України. Зміст Проекту викладено на 78 сторінках у 16 розділах. Він є внеском ЄС-МОП у сприяння ефективному узгодженню законодавства України з основними чинними міжнародними та європейськими стандартами у сфері праці та успішною практикою їх застосування. Авторами статті, які є науковцями Київського національного університету будівництва та архітектури, проаналізовано відповідність Проекту настановам Постанови Кабінету Міністрів України від 12.12.2018 р. № 989-р. «Про реформування системи охорони праці в Україні», а також доцільність імплементування його у Закон України. Крім того, має сенс порівняти Проект з напрацюваннями науковців України щодо цих питань та врахувати особливості створення та забезпечення безпечних і здорових умов праці в Україні [7]. Як бачимо, коло питань досить широке і вимагає глибокого вивчення та з'ясування. Бібліографічний огляд свідчить – досі публікацій за цією тематикою не було, що свідчить про актуальність цієї статті.

У цьому аналізі розглянуто питання охорони праці (на даний час цей термін є визначальним як у нормативно-правових актах, так і у багатьох наукових дослідженнях і у виробничій діяльності в Україні). У Проекті пропонується замінити його терміном «безпека праці та здоров'я працівників», як це прийнято у світовій практиці. Такий термінологічний перехід не є простим і не може бути суто формальним.

По-перше, змінюється світоглядне розуміння проблем, які у Проекті вирішуються не в контексті абстрактного терміну «охорона праці», а максимально наближено до проблем безпечної безтравматичної та комфортної виробничої діяльності людини-працівника. По-друге, ця зміна понять має бути усвідомлена суспільством, включаючи необхідність та наслідки такого кроку. І, по-третє, мабуть, найскладніше, – треба замінити застаріле поняття в усіх

законах, нормативно-правових документах, положеннях. Не дивлячись на начебто уявну простоту, цей термін є наріжним каменем реформування правових і соціальних відносин у сфері матеріального виробництва та суспільства в цілому. На це потрібен час і додаткові матеріально-фінансові витрати. Необхідно узаконити нову термінологію.

Проблематика та заходи, запропоновані у Проекті, досліджувалися у тій чи іншій мірі у працях провідних наукових організацій України, серед яких слід відзначити ДУ «ННДІПБОП», Національний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Національний авіаційний університет, Київський національний університет будівництва та архітектури та інші. На жаль, суттєвою відмінністю наукових досліджень в Україні є те, що вони практично мало використані для удосконалення законодавства. Це значною мірою обумовлює відставання осучаснення методології управління системою безпеки та гігієни праці в Україні.

**За безумовної підтримки необхідності прийняття Закону України «Про безпеку праці та здоров'я працівників» з використанням основних положень Проекту ЄС-МОП необхідно врахувати наступне:**

1. Пропонований Проект спрямовано на поглиблене реформування системи охорони праці. З огляду на це, Закон України «Про охорону праці» необхідно повністю переглянути, фактично йдеться про створення нового закону.

2. Необхідно здійснити на практиці заміну поняття «охорона праці» на «безпека праці та здоров'я працівників», а також низки інших понять, що застосовуються у нас і яких немає у світовій практиці.

3. У свою чергу, Проект потребує редагування та експертної оцінки компетентними фахівцями, особливо щодо врахування місцевих умов, які багато в чому відрізняються від зарубіжних у сферах виробництва і життєдіяльності.

4. Грунтуючись на дослідженнях ДУ «ННДІПБОП», де чільне місце належить науково-методичним розробкам стосовно ризик-орієнтованої моделі безпеки праці, доцільно доповнити розділ VII Проекту щодо методології впровадження ризик-орієнтованої моделі як основи реформування безпеки праці в Україні.

5. Бажано розглянути, наскільки правомірно в одному законопроекті суміщати питання безпеки праці та специфічні питання трудового права та гендерної проблематики, як це зроблено у Проекті ЄС-МОП.

Об'єм статті не дозволяє висвітлити усі розділи та статті Проекту, тому вони представлені вибірково, виходячи з того, що необхідно звернути основну увагу на:

- найбільш актуальні в умовах України аспекти, що займають чільне місце у Проекті;
- нові положення, які відсутні у законодавстві України;
- нові термінологічні визначення.

У статтях Проекту ЄС-МОП викладено практично всі аспекти складної та багатогранної діяльності з проблем безпеки праці та трудового права.

Розглянуто найбільш актуальні для нашого сьогодення розділи та статті, що увібрали в себе важливі теоретичні та практичні надбання безпеки та гігієни праці, відображені у законах європейських країн і США, а також у численних Директивах ЄС, що поступово імплементуються у законодавче поле України.

Частина розділів є достатньо традиційними і співпадають з відповідними вітчизняними напрацюваннями, однак досить багато статей можуть бути тою чи іншою мірою використані безпосередньо у тексті нового закону. Це стосується розділу I, а також частково розділу II щодо окремих елементів політики в галузі охорони праці, розділу III в частині обов'язків працівників, розділів IV і V стосовно навчання, консультації та залучення працівників, розділу VII щодо організації служби охорони праці, розділу XIV відносно аналізу нещасних випадків. Такі розділи, як XV – «Сприяння, контроль і забезпечення вимог безпеки та здоров'я», XVI – «Адміністративна відповідальність» містять статті щодо обов'язковості персональної відповідальності та міри покарання за невиконання тих чи інших положень і статей законодавства посадовими особами та, особливо, роботодавцями, що також мають увійти у законодавство України з питань безпеки працівників.

**Розділ I** визначає правові, організаційні, економічні та соціальні засади безпеки та гігієни праці в Україні і має своїм завданням забезпечення безпеки працівників і попередження нещасних випадків та професійних захворювань.

Проектом імплементуються у правову систему України важливі директиви Європейського Союзу.

Забезпечується подальше наближення національного законодавства з питань безпеки та гігієни праці до міжнародних стандартів, встановлених Міжнародною організацією праці (МОП).

Проектом забезпечується подальше наближення національного законодавства з питань безпеки та здоров'я на роботі до міжнародних стандартів праці, встановлених МОП:

1. Конвенція 2006 року про основи безпеки та здоров'я на роботі (№ 187);
2. Конвенція про безпеку та гігієну праці та виробниче середовище (№ 155);
3. Протокол 2002 року до Конвенції про безпеку та здоров'я на роботі 1981 року;
4. Конвенція про служби гігієни праці 1985 року (№ 161).

Дія Проекту поширюється на всіх працівників і роботодавців, незалежно від їхньої форми власності та виду діяльності.

Терміни щодо працівника та роботодавця вживаються у такому значенні:

**Працівник** – будь-яка фізична особа, яка, незалежно від наявності офіційно укладеного трудового договору, зобов'язується за винагороду виконувати інтелектуальну чи фізичну діяльність на користь іншої особи, під її керівництвом, наглядом, контролем та управлінням, а також особи, що проходять навчання, стажування чи виробничу практику; самозайняті працівники, які за законодавством вважаються економічно залежними від діяльності бенефіціара; особи, які виконують роботи або надають послуги на користь іншої особи за рішенням суду.

**Роботодавець** – будь-яка фізична або юридична особа, яка перебуває у трудових відносинах із працівником і несе відповідальність за підприємство та/або установу, а також приймає стажерів, практикантів та учнів; яка отримує вигоду від діяльності економічно залежного самозайнятого працівника; отримує вигоду від роботи, виконуваної особами на підставі рішення суду; або, у випадках, передбачених цим законом, несе відповідальність за приміщення, в якому виконуються роботи.

Ці два термінологічних визначення принципово відрізняються від існуючих у нашому законодавстві, де через недосконалість, а то й умисне викривлення тих чи інших положень має місце утиск прав працюючих. Таким чином створювалося підґрунтя для безкарності недобросовісних роботодавців у випадках травматизму та невідшкодування за нього.

Ще одним важливим терміном цього розділу є поняття ризику, яке в Україні не є однозначним. Це необхідно подолати і перейти до однозначного терміну, що використовується в документах ЄС: **«професійний ризик – це поєднання ймовірності настання небезпечної події, що виникає внаслідок виконання роботи або в ході її виконання, та тяжкості травми чи шкоди для здоров'я працівників, що така подія спричиняє»**.

Важливими є поняття, пов'язані з ризик-орієнтованою моделлю безпеки праці, а саме:

- управління професійними ризиками – систематичний і постійний процес моніторингу, контролю та перегляду професійних ризиків, зокрема, виявлення факторів небезпеки, аналіз, зважування та оцінка професійних ризиків, а також здійснення запобіжних і захисних заходів для усунення професійних ризиків чи їхнього зменшення до прийнятного рівня;

- безпечні умови праці – стан умов праці, за яких несприятливі чи шкідливі професійні чинники відсутні або їхній рівень не перевищує гранично допустимих значень;

- оцінювання професійних ризиків – систематичний та безперервний процес вивчення всіх аспектів, пов'язаних із роботою, з метою визначення професійних небезпек і аналізу (як якісного, так і кількісного) та оцінки професійних ризиків для безпеки і здоров'я працівників на роботі.

Інші терміни вживаються у значеннях, наведених у Кодексі законів про працю України, законах України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування», «Про основні засади державного нагляду (контролю) у сфері господарської діяльності».

**У розділі II** викладено положення щодо політики та системи безпеки і здоров'я.

Запобігання професійним ризикам має ґрунтуватися на оцінці ризиків і розроблятися відповідно до принципів, політики, стандартів і програм, якими забезпечується розробка та реалізація Національної стратегії безпеки та здоров'я. Вона має бути спрямована на реалізацію права на безпеку та здоров'я на роботі шляхом забезпечення узгодженості заходів та ефективності дій з боку державних, приватних або кооперативних структур, які в цьому контексті виконують обов'язки у сферах регулювання, ліцензування, сертифікації, стандартизації, досліджень, навчання, інформування, консультацій та залучення, а також технічних служб запобігання, нагляду у сфері здоров'я та інспектування.

Статистична інформація повинна давати можливість вести облік нещасних випадків та професійних захворювань з метою сприяння дослідженням, тим самим забезпечуючи можливість прийняття відповідних критеріїв і методологій для розроблення загальнодержавних і галузевих програм та заходів запобігання, а також ведення регулярного контролю результатів.

**Важливо в умовах нашої країни є стаття 11 Проекту щодо забезпечення умов для підвищення рівня досліджень у галузі безпеки та**

**здоров'я на роботі, яка не має аналогів у вітчизняному законодавстві про охорону праці.** Наведемо цю статтю з незначними скороченнями:

**1. Заохочення державою досліджень у сфері безпеки та здоров'я повинно здійснюватись за такими векторами:**

- підтримка створення дослідницьких структур і структур післядипломного навчання для спеціалістів і дослідників;
- поширення науково-технічної інформації, що сприяє просуванню знань та досягненню прогресу у дослідженнях;
- заохочення вивчення передового досвіду у галузі організаційних і оперативних систем превентивної діяльності.

**2. Наукові дослідження з питань безпеки та здоров'я на роботі фінансуються за рахунок бюджетних коштів, які виділяються для сфери науки та освіти.**

**3. Наукові дослідження з питань безпеки та здоров'я на роботі можуть отримувати фінансування від будь-яких юридичних чи фізичних осіб або від неурядових організацій, із будь-яких джерел, не заборонених законом.**

У цьому розділі також акцентується увага на проблемах, пов'язаних із безпекою машин і робочого обладнання.

**Розділ III визначає права і зобов'язання роботодавців і працівників.**

У наших умовах пріоритетними щодо взаємовідносин у виробничих умовах та у законодавстві про охорону праці є питання прав працівників і обов'язки (відповідальність) роботодавців. Розглянемо їх згідно з оригіналом Проекту з незначними купюрами.

**Стаття 17. Загальні зобов'язання роботодавців**

1. Постійно та безперервно забезпечувати безпеку та здоров'я працівників у всіх аспектах, пов'язаних із роботою, застосуванням та постійним пристосуванням до змін в обставинах необхідних запобіжних і захисних заходів для забезпечення безпеки та здоров'я працівників, із суворим дотриманням принципів запобігання:

- 1) Уникнення ризиків.
- 2) Планування запобіжних заходів як системи, у яку інтегровані технічні розробки, схема організації праці, умови роботи, соціальні відносини та вплив факторів навколишнього середовища.
- 3) Визначення факторів небезпеки та оцінка передбачуваних ризиків у всіх видах діяльності підприємства з метою усунення ризиків.
- 4) Подолання ризиків у джерелі їхнього виникнення з метою усунення.
- 5) Забезпечення відсутності ризику від впливу хімічних, фізичних та біологічних агентів і психосоціальних факторів.
- 6) Пристосування роботи до працівника, вибору робочого обладнання, методів роботи та виробництва з метою пом'якшення наслідків монотонної роботи та зниження психосоціальних ризиків.
- 7) Адаптація до нових форм організації праці, шляхом постійного контролю та застосування технологічних досягнень.
- 8) Заміна небезпечного на безпечне чи менш небезпечне.

2. Роботодавець повинен реєструвати та розслідувати будь-які нещасні випадки на роботі, нещасні випадки на роботі, що призвели до непрацездатності тривалістю понад три робочі дні, а також підозри на професійні захворювання.

3. Роботодавець повинен запроваджувати заходи та надавати вказівки, відповідно до яких у разі серйозної та прямої загрози працівники можуть негайно залишати місце роботи та не відновлювати роботу, поки така загроза триває.

4. У випадках, передбачених законодавством, роботодавці зобов'язані отримувати дозвільні документи від компетентних органів.

#### **Стаття 19. Права працівників**

1) на забезпечення роботодавцем безпечних та здорових умов праці;  
2) на відсутність необхідності нести будь-які фінансові витрати, пов'язані з безпекою та здоров'ям на роботі;

3) на інформацію щодо професійних ризиків, які на них впливають або можуть впливати, а також про запобіжні та захисні заходи;

4) на отримання відповідної підготовки щодо безпеки та здоров'я на роботі, яка відповідає характеру роботи та ризикам і яка повинна проходити в робочий час;

5) на проходження медичного обстеження з метою оцінки своєї фізичної та психологічної підготовленості до роботи;

6) на відсутність будь-яких негативних і несправедливих наслідків для себе та на захист від них;

7) на відмову від роботи у випадку серйозної та прямої загрози для свого життя та здоров'я;

8) на захист від необґрунтованих утисків або дисциплінарних заходів за повідомлення про нещасний випадок, професійне захворювання, небезпечну подію;

9) на захист від факторів небезпеки, які стосуються його безпосередньо;

10) на подання скарг до центрального органу виконавчої влади, який виконує функції інспекції праці, щодо незабезпечення роботодавцем безпечних та здорових умов праці, а також на подання своїх зауважень під час інспекційних відвідувань центрального органу виконавчої влади, що здійснює функції інспекції праці;

11) на отримання компенсації відповідно до закону за будь-яку шкоду, спричинену нещасним випадком на роботі чи професійним захворюванням.

**Розділ IV. Навчання та інформування і Розділ V. Консультації та залучення працівників** – принципово мало відрізняються від аналогічних вимог вітчизняного законодавства.

**Розділ VI. Організація безпеки та здоров'я** – складається з трьох частин, дві з яких мають важливе значення і мають бути імplementованими у наше законодавство. Діяльність служби безпеки та здоров'я на роботі спрямована на:

1. Створення умов праці, що забезпечують безпеку працівників, їхнє фізичне та психічне здоров'я.

2. Запровадження технічних умов, які забезпечують застосування запобіжних заходів.

3. Інформування, навчання працівників з питань безпеки та здоров'я на роботі.

У статтях 31 і 32 викладено основні напрями діяльності служби безпеки та здоров'я, які практично повторюють те, що викладено у окремих статтях розділів II і III.

У статтях 33–36 частини II **Розділу VI** йдеться про функціонування служб безпеки та здоров'я, включаючи медичні аспекти.

**У Розділі VII. Робота з підвищеним ризиком** – у статтях 45 і 46 розглянуто види діяльності, що пов'язані з підвищеним ризиком, та спеціальні умови виконання таких робіт, наведено умови ліцензування, організації підготовки небезпечних робіт і вимоги та настанови щодо їх виконання. Вони заслуговують на увагу з огляду на професійний, юридичний та соціальний підхід до забезпечення безпеки праці та здоров'я працюючих у складних виробничих умовах з урахуванням низки Директив ЄС. Особливістю статті 46 цього розділу є те, що відмічено, у яких випадках забороняється видача ліцензії на ризиковані види робіт.

**Розділи: VIII. Захист генетичного спадку; IX. Діяльність, яка заборонена або яка здійснюється відповідно до певних умов; X. Безпека праці та здоров'я вагітних працівниць; XI. Робота неповнолітніх осіб; XII. Працівники з обмеженими фізичними можливостями та хронічними захворюваннями; XIII. Працівники, що мають трудові відносини з фіксованим терміном,** – мають бути розглянуті в сенсі їх використання у новому законі.

**Розділ XIV. Нещасні випадки на роботі та професійні захворювання** – в основному відповідає вітчизняному Положенню про розслідування нещасних випадків, професійних захворювань та аварій, яке було переглянуто з урахуванням зарубіжного досвіду декілька років тому. За необхідності, його можна буде відредагувати з урахуванням окремих уточнень щодо тексту цього розділу. Особливо це може стосуватися відображення дій та персональної відповідальності роботодавця.

Надважливо звернути увагу на відшкодування збитків потерпілим, у зв'язку з чим відповідну статтю наведено повністю.

**Стаття 84. Відшкодування збитків, спричинених нещасними випадками на роботі та професійними захворюваннями.**

Роботодавець забезпечує загальнообов'язкове державне соціальне страхування працівників відповідно до законодавства.

**Розділ XV. Сприяння, контроль і забезпечення дотримання вимог безпеки та здоров'я.** Поряд з викладенням повноважень центрального органу виконавчої влади у статті 86 відображено діяльність інспекторів праці, які забезпечують реалізацію державної політики з питань безпеки та здоров'я. Ці питання мають бути сформульовані чітко і однозначно, що далеко не завжди має місце. Складність виконання повноважень інспекторів полягає також у тому, що відповідними інстанціями можуть вводитися обмеження та заборони на виконання тих чи інших інспекторських функцій, чого не повинно бути.

**Стаття 87. Повноваження інспекторів праці**

1. Для належного виконання своїх обов'язків інспектори праці мають повноваження:

- 1) відвідувати без попереднього повідомлення, у будь-який час вдень і вночі, будь-яку робочу зону, зокрема виробничі, службові та адміністративні приміщення юридичних осіб будь-якої форми власності, діяльності чи господарського типу, та фізичних осіб, які використовують найману працю, з питань, які входять до їхньої компетенції;
- 2) проведення будь-якої експертизи, інспекції чи розслідування, надання документів, які вважаються необхідними для перевірки дотримання законодавства про безпеку та здоров'я згідно з посадовою інструкцією;



- 3) при проведенні інспекції вживати необхідних захисних заходів на запобігання знищенню, зникненню чи зміні документів, інших записів і подібних ситуацій;
- 4) подавати роботодавцям письмову вимогу, що має обов'язкову силу, та/або припис про усунення порушень законодавства про безпеку та здоров'я, причин та умов, які їх викликають, в тому числі з метою усунення недоліків обладнання, устаткування чи методів роботи, стосовно яких існують підстави вважати їх такими, що становлять загрозу здоров'ю чи безпеці працівників;
- 5) складати протоколи про адміністративні правопорушення, розглядати справи про такі правопорушення та накладати адміністративні стягнення та штрафи.

**Розділ XVI. Адміністративна відповідальність за порушення у сфері безпеки та здоров'я** – особливо важливий для застосовування у нас, тому що аналога у законодавстві України немає. Це стосується, в першу чергу, роботодавців, відповідальність яких за порушення у галузі безпеки та здоров'я або розмита, або вихолощена і фактично є декларативною.

Суб'єкт, відповідальний за трудові проступки та сплату відповідних штрафів:

- роботодавець несе відповідальність за трудові проступки, навіть якщо їх допустили його працівники при виконанні службових обов'язків;
- відповідальність працівника, який вчинив порушення, повинна оцінюватися в рамках дисциплінарного провадження, розпочатого роботодавцем відповідно до закону. Якщо за результатами такого провадження буде зроблено висновок про відповідальність працівника і застосування санкцій до нього, роботодавець може застосувати до такого працівника відповідні санкції, передбачені законом;
- якщо порушник є юридичною особою, спільну з ним відповідальність за сплату штрафу несуть відповідні адміністратори, керівники та директори.

**Фінансові санкції (штрафи) залежать від:**

1. Обороту/річного бюджету.
2. Рівня тяжкості трудових проступків. Застосовується наступна класифікація трудових проступків:
  - легкі;
  - серйозні;
  - дуже серйозні.
3. Ступеня провини порушника – при визначенні застосовного штрафу та з урахуванням дій порушника застосовується наступна класифікація рівнів провини:
  - недбалість;
  - навмисні чи зловмисні дії.
4. Сума штрафу може складати:
  - За легкі проступки/порушення від 200 до 1500 євро;
  - За серйозні проступки/порушення від 500 до 10000 євро;
  - За дуже серйозні та неодноразові проступки/порушення суми штрафу значно збільшуються.

## **Розділ XVII. Заклучні та перехідні положення. Цим розділом Проєкту ЄС-МОП передбачається, що:**

1. Новий Закон України «Про безпеку та здоров'я працівників» має набути чинності через рік після його прийняття Верховною Радою України та опублікування.

2. Закон України «Про охорону праці» (Відомості Верховної Ради України, 1992 р., № 49, (зі змінами та доповненнями) визнається таким, що втратив чинність.

3. Вноситься ряд змін до Кодексу законів про працю України та інших законодавчих актів.

## **Висновки**

1. У зв'язку з просуванням України до членства у Євросоюзі, за основу оновлених національних нормативних актів у сфері охорони праці доцільно узяти відповідні документи ЄС. Крім нормативів у окремих сферах діяльності (чинників несприятливого впливу), необхідно розробити і впровадити концептуальний документ, що регламентує підходи до безпеки працівника (Закон України).

2. Обов'язковою складовою відповідного документу є чітке визначення понять «працівник» та «роботодавець», що унеможливить різночитання і спростить юридичні процедури.

3. Важливим є законодавче регулювання та заохочення наукових досліджень у сфері цивільної безпеки (охорони праці), що ніяким чином не регламентується у чинних нормативно-правових актах.

4. Найважливішою складовою проєкту Закону України «Про безпеку та здоров'я працівника» є офіційне визначення професійних ризиків та застосування ризик-орієнтованого підходу.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS on an EU Strategic Framework on Health and Safety at Work 2014-2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2014:332:FIN>.

2. Directive 2013/59/Euratom – protection against ionising radiation (Директиви з охорони праці). <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2013-59-euratom-protection-against-ionising-radiation>.

3. Directive 2013/35/EU – electromagnetic fields. <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2013-35-eu-electromagnetic-field>.

4. Directive 2006/25/EC – artificial optical radiation. <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2006-25-ec-of-the-european-parliament-and-of-the-council-of-5-april-2006>.

5. Directive 2003/10/EC – noise. <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/82>.

6. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM–2015 [acting from July 2008]. Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN. 2015. 2 p. URL: <https://buildingbiology.com/site/wp-content/uploads/standard-2015-englisch.pdf> (дата звернення: 30.08.2019).

7. Здановський В.Г., Кружилко О.Є. Наукові розробки ризик-орієнтованого підходу у сфері охорони праці (Науковий супровід Концепції реформування системи охорони праці в Україні). Монографія. «Університетська книга», м. Суми, 2020. 380 с.

*Стаття надійшла до редакції 25.01.2022 і прийнята до друку після рецензування 24.05.2022*

## REFERENCES

1. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS on an EU Strategic Framework on Health and Safety at Work 2014-2020. Retrieved from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2014:332:FIN>.
2. Directive 2013/59/Euratom – protection against ionising radiation. Retrieved from: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2013-59-euratom-protection-against-ionising-radiation>.
3. Directive 2013/35/EU – electromagnetic fields. Retrieved from: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2013-35-eu-electromagnetic-field>.
4. Directive 2006/25/EC – artificial optical radiation. Retrieved from: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2006-25-ec-of-the-european-parliament-and-of-the-council-of-5-april-2006>.
5. Directive 2003/10/EC – noise. Retrieved from: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/82>.
6. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM–2015 [acting from July 2008]. Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN. (2015). 2 p. Retrieved 30.08.2019 from: <https://buildingbiology.com/site/wp-content/uploads/standard-2015-englisch.pdf>.
7. Zdanovsky, V.G., & Kruzhilko, O.E. (2020). Scientific development of a risk-oriented approach in the field of labor protection (Scientific support of the Concept of reforming the labor protection system in Ukraine). Sumy: "University Book" [in Ukrainian].

*The article was received 25.01.2022 and was accepted after revision 24.05.2022*

### **Здановський Володимир Григорович**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури

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

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0001-8303-4254> **e-mail:** [zdanovsky\\_volodymyr@ukr.net](mailto:zdanovsky_volodymyr@ukr.net)

### **Глива Валентин Анатолійович**

доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури

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

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-1257-3351> **e-mail:** [glyva.valentin@gmail.com](mailto:glyva.valentin@gmail.com)

### **Бурдейна Наталія Борисівна**

кандидат педагогічних наук, доцент, професор кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури

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

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-2812-1387> **e-mail:** [burdeina.nb@knuba.edu.ua](mailto:burdeina.nb@knuba.edu.ua)

UDC 004.85: 004.89: 519.25:519.651: 532.5.013.12: 627.152

**Yaroslav V. Khodnevych**, PhD (Engineering), Research Scientist  
ORCID ID: 0000-0002-5510-1154 *e-mail*: ya.v.khodnevych@gmail.com

**Dmytro V. 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

## **DATA ARRANGEMENTS TO TRAIN AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK WITHIN SOLVING THE TASKS FOR CALCULATING THE CHÉZY ROUGHNESS COEFFICIENT UNDER UNCERTAINTY OF PARAMETERS DETERMINING THE HYDRAULIC RESISTANCE TO FLOW IN RIVER CHANNELS**

***Abstract.** Hydraulic calculations and mathematical modelling of open flows in river channels keep still being among the most topical hydro-engineering today's problems in terms of practice. While solving them, independently on the research topic and purpose, and methods used, a number of simplifications and assumptions are usually accepted and applied. Moreover, there is a range of methodological, structural, and parametric uncertainties, which to be overcome require complex empirical pre-researches. First of all, these uncertainties relate to assessing hydraulic resistances and establishing numerical characteristics of them, which depend on many factors varying spatially and temporally.*

*One of the most frequently used integral empirical characteristics expressing the hydraulic resistance to open flows in river channels is the Chézy roughness coefficient  $C$ . However, despite a large number of empirical and semi-empirical formulas and dependencies to calculate the Chézy coefficient, there is no ideal way or method to determine this empirical characteristic unambiguously. On the one hand, while opting for an appropriate formula to calculate the Chézy coefficient, we need to take into account practical experience based on comprehensive options analysis considering different empirical equations used alternatively to represent the hydraulic resistance to open flows. On the other hand, the fullness and comprehensiveness of field researches of numerous hydro-morphological factors and parameters characterizing various aspects of the hydraulic resistance to open flows can also have an essential role. In particular, the accuracy assessment of the Chézy coefficient computing based on field data, despite methods and formulas, indicates that the accuracy of field measurements of the parameters included in selected formulas largely determines the relative error of such calculations.*

*This paper deals with the problem of data arrangements and the development of general rules for the formation of training and test samples of data to train artificial neural networks being elaborated to compute the Chézy coefficient taking into account the parametric uncertainty of data on the hydro-morphological factors and parameters characterizing the hydraulic resistance in river channels. The problem is solved on the example of an artificial neural network of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function.*

***Keywords:** artificial neural networks; Chézy's roughness coefficient; data arrangements; hydraulic resistance in river channels; parametric uncertainty*

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.59-85>

## 1. Introduction

The concept of hydraulic resistance is widely used to solve numerous practical hydro-engineering and fluid mechanics tasks, in particular, those relating to open flows in river channels [1-4]. Among them, first of all, we need to note common hydraulic calculations of the river channels' capacity and the position of the free water surface of open streams [1, 3, 4]. The notion of hydraulic resistance is also used while solving the special tasks of mathematical modelling of streams with free surface in canals and river channels within one (1D) and two-dimensional (2D) flow models of shallow water (non-linear de Saint-Venant equations) describing unsteady open channel flow [5-10]. For instance, the above-mentioned models are applied in numerous modern computational modelling systems, such as the HEC-RAS River Analysis System supporting steady and unsteady flow water surface profile calculations, sediment transport computations, and water quality analyses, etc. [11]. The shallow water models keep successfully competing with more advanced today's hydrodynamic solutions based on the Navier-Stokes equations of the real fluid motion and Reynolds' averaged equations of turbulent water flow, which describe the behaviour of an unsteady three-dimensional flow. Applying them, we avoid assumptions and simplifications that are connected with the hydraulic resistance concept usage. However, results obtained from traditional hydraulic calculations and flow modelling due to 1D and 2D shallow water models may be used as boundary conditions for the next computations based on the Reynolds and Navier-Stokes equations [12-14]. Such an approach can essentially simplify solutions to complex real-world case study tasks of hydrodynamics [13]. Some additional examples of recent pieces of literature relating to the use of 1D and 2D flow models of shallow water are also highlighted in [15-18].

Relying on hydraulic resistance concept when performing traditional hydraulic calculations and mathematical modelling of open flows in river channels, we keep repeatedly dealing with the complex challenge relating to determining numerical characteristics of hydraulic resistance in spite of this problem has long been considered by hydraulic scientists and engineers. Regarding practice, it has still been discussed even in terms of a friction factor (namely, the Darcy-Weisbach friction factor) [19-23] or a roughness coefficient [24-33] usage as appropriate hydraulic resistance numerical characteristics. In the last case, in term of a roughness coefficient, there are also two options, namely, which of them, the Manning roughness coefficient or the Chézy roughness coefficient might fit better.

Admittedly, there are three practically equivalent empirical equations (or appropriate empirical models) linking mean flow velocity  $V$  to the hydraulic resistance numerical characteristics. They are the Chézy, Manning (Gauckler-Manning or Gauckler-Manning-Strickler), and Darcy-Weisbach equations, which may be summarized as [1, 3, 4, 30-33]:

$$V = C\sqrt{R \cdot S_f} = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_f} = \sqrt{\frac{8g \cdot R \cdot S_f}{\lambda}}, \quad (1)$$

where  $C$  is the Chézy roughness coefficient ( $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ ),  $n$  is the Manning (Gauckler-Manning) roughness coefficient ( $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ ), and  $\lambda$  is the Darcy-Weisbach friction factor;  $V = Q/A$  is the depth-averaged or cross-sectional averaged velocity ( $\text{m}/\text{s}$ ),

$Q$  is the water discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $A = B \cdot h$  is the cross-sectional area of the flow ( $\text{m}^2$ ),  $B$  is the average flow width (m),  $h$  is the average flow depth (m),  $R = A/P$  is the hydraulic radius (m),  $P$  is the wetted perimeter (m),  $S_f$  is the energy grade line slope (or the water surface slope);  $g$  is the gravitational acceleration ( $\text{m}/\text{s}^2$ ).

Usually, the Chézy roughness coefficient  $C$  and the Manning roughness coefficient  $n$  are used in calculating the averaged velocity of open flows; the Darcy-Weisbach friction factor  $\lambda$  is more common in calculating the averaged velocity of water movement in pipelines [1, 3, 4]. However, there are no formal restrictions on the use of one or another numerical characteristic of hydraulic resistance, independently on whether it is an open flow or a water movement in a pipeline. The Darcy-Weisbach formulation of hydraulic resistance is used for open flows either [6, 9, 19-23, 26].

Formally, if we take into account the equivalence of equations (1) the following simple relationships between the roughness coefficients  $C$ ,  $n$ , and the friction factor  $\lambda$  may be established:

the Chézy roughness coefficient  $C$  will relate to the Darcy-Weisbach friction factor  $\lambda$  as [3, 4, 33]:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}, \quad \lambda = \frac{8g}{C^2}; \quad (2)$$

the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$  will relate to the Darcy-Weisbach friction factor  $\lambda$  as [15, 19, 33]:

$$n = \sqrt{\frac{\lambda \cdot R^{1/3}}{8g}}, \quad \lambda = \frac{8g \cdot n^2}{R^{1/3}}; \quad (3)$$

and, eventually, the Chézy roughness coefficient  $C$  will relate to the Manning (Gauckler-Manning) roughness coefficient  $n$  as:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad n = \frac{C}{R^{1/6}}. \quad (4)$$

Practice shows, it does not matter what the kind of characteristic of the hydraulic resistance to open flow in river channels we use, whether it is the friction factor  $\lambda$  or one of the two roughness coefficients, either the roughness coefficient  $C$  or  $n$ . More important is how fully it can characterize the hydraulic resistance in a real-world case study, as well as how accurately we can calculate numerical values of the appropriate characteristic relating to this case study.

It should be noted that historically the first empirical equation linking mean flow velocity  $V$  to the hydraulic resistance was the Chézy formula, which was obtained by the famous French hydraulic engineer Antoine de Chézy in 1775. It concerned the velocity of pipe flows, but in the modified form  $V = C\sqrt{R \cdot S_f}$  Chézy proposed to use this dependence for open channel flows as well. In general, Chézy's equation

can be considered as the most generalized empirical model in open-channel hydraulics [1, 3, 4]. We tried showing it in Fig. 1.

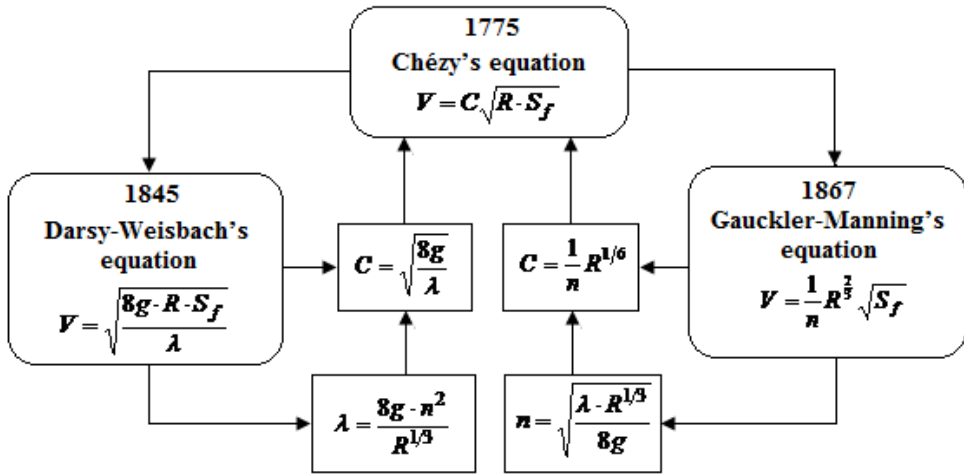


Fig. 1. Flow-chart to explain relationships between the Chézy, Gauckler-Manning, and Darcy-Weisbach equations in the context of empirical models of the hydraulic resistance to open flows in river channels

The next empirical equation was the Darcy-Weisbach formula. It was first proposed by Julius Weisbach in 1845 and relates the head loss  $\Delta h$  due to friction along a given length  $L$  of pipe with diameter  $D$  to the average velocity  $V$  of the fluid flow for an incompressible fluid as [1, 3, 4, 23, 34]:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}, \tag{5}$$

where the dimensionless friction factor  $\lambda$  is regarded as a function of relative roughness and the Reynolds number (Re) characterizing flow regime.

At present, in hydraulics, there seems to be no formula more accurate or universally applicable than the Darcy-Weisbach equation (5) supplemented by the Moody diagram or Colebrook equation [34]. Therefore, a lot of modern formulas and dependencies proposed to calculate the Chézy resistance coefficient are derived from the relationship (2), which links the Chézy coefficient with Darcy-Weisbach's friction factor [19, 20, 23, 33]. The latter one, in turn, is also determined due to various empirical formulas [20, 22, 28, 29, 35].

The third, Gauckler-Manning's formula was first presented by the French engineer Philippe Gauckler in 1867 and later re-developed by the Irish engineer Robert Manning in 1890 [1, 3, 4]. This equation can be obtained by use of dimensional analysis. Moreover, in the 2000s the Gauckler-Manning formula was derived theoretically using the phenomenological theory of turbulence [36, 37].

The Gauckler-Manning formula is not so universal one as the Chézy and Darcy-Weisbach equations. It can only be applied to streams that have a free surface, such as an open channel, etc. This formula can be considered as a kind of approximation of the Chézy formula, namely, as a partial case of Chézy's equation, when the Chézy

coefficient values relate to the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$  values according to the relationship (4). In addition, in contrast to the Darcy-Weisbach friction factor  $\lambda$ , the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$  does not depend on the Reynolds number and flow regime, which needs being taken into account while analysing hydraulic resistance.

To sum, in term of quantitative presentation of the hydraulic resistance to open flows in river channels, the Chézy roughness coefficient  $C$  can be thought to be the most complete empiric numerical characteristic compared with the Darcy-Weisbach friction factor  $\lambda$  and Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$ . This is because natural watercourses like rivers are characterized by a significant variety of hydro-morphology conditions changing in space and time. Usually, the hydro-morphological changes occur constantly, although stochastically, seasonally, and regularly. Sometimes, they occur sporadically on large scales. The hydraulic resistance to open currents in river channels can depend on manifold elements of roughness such as bottom ridges, dunes, and riffles, turns and bends of a channel, heterogeneity of size and shape of a river channel along its length, including suspended sediments and bottom deposits, vegetation, ice, and others. In some parts of a river, at local scales, essential hydro-morphological changes can occur due to compressions of river channels and floodplains because of temporary formations, such as ice gorges, rubbish of logging, recent alluvial deposits, etc. As a result, similar water levels in rivers can be observed at different water discharges, and vice versa [38]. Human activity can also change dramatically the hydraulic resistance within a river channel and within its floodplain. Herewith, errors, oversights, and flaws in determining the hydraulic resistance, especially when it comes to forecasting flood danger, can result in catastrophic consequences (Fig. 2).



The Halych town inundation



A flooded solar power plant

Fig. 2. Consequences of the June flood of 2020 on the Dniester River near the Halych town (from [www.pravda.com.ua](http://www.pravda.com.ua))

Thereby, the comprehensive pre-studies relating to estimation of the hydraulic resistances in river channels can be thought an urgent need. In particular, the current comprehensive research of integral empirical numerical characteristics of the hydraulic resistances would open up significant opportunities to prompt flood risk management on rivers. Considering the variety of hydro-morphology and hydrology of rivers, the Chézy roughness coefficient  $C$  seems the fittest numerical characteristic to present the hydraulic resistance to open flows in river channels comparing with other integral empirical characteristics, namely, the Darcy-Weisbach



friction factor  $\lambda$  and Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$ . The Chézy coefficient seems to be the most holistic and dynamic numerical empirical characteristic comparing with others. The Chézy coefficient enables to control more factors and parameters determining the hydraulic resistance to open flows in river channels. Using it, we can take into account features of individual river sections and their hydraulic regimes. Eventually, the friction factor  $\lambda$  and roughness coefficient  $n$  are often included to formulas and dependencies to calculate the Chézy roughness coefficient  $C$  just as needed components.

## 2. Generalization of the problem. The research aim and objectives

Currently, there are a lot of different empirical and semi-empirical formulas and dependencies in order to calculate the Chézy roughness coefficient values within solving real-world tasks of hydro-engineering calculations and mathematical modelling of open flows in river channels. In the previous study [33], we examined and systematised some well-known of those presented in the literature on open-channel hydraulics, in reference books, tutorials, manuals, and articles highlighting the results of original research on analyzing the hydraulic resistance to flow in open channels. Moreover, numerous publications on mathematical modelling of uniform and non-uniform water flow within 1D and 2D flow models of shallow water were reviewed. In total, we gathered 43 empirical dependencies to compute the Chézy coefficient values, as well as 13 empirical dependencies that can be used to calculate the Gauckler-Manning roughness coefficient values. Based on these dependencies, near 250 empirical equations can be compiled to compute the Chézy coefficient values taking into account hydro-morphology peculiarities of river channels, various flow regimes, specific application limits of the formulas, etc.

We divided all examined empirical formulas to compute the Chézy coefficient into five groups [33]. The four groups are represented with explicit dependencies, which allow calculating the Chézy coefficient values directly due to values of the parameters included in those formulas. The fifth group consists of implicit formulas, which need applying a trial-and-error procedure (iterative calculation).

The first group of explicit formulas, those we analysed and systemised [33], consists of thirteen dependencies the Chézy coefficient  $C$  on the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$  and the hydraulic radius  $R$  :

$$C = f(n, R), \quad (6)$$

where the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$  characterises the roughness of the banks and bottom of river channels and floodplains; the roughness coefficient  $n$  values can be obtained in different ways, in particular, due to selecting them from published in the literature on open-channel hydraulics  $n$ -value tables [1, 3, 4, 24, 25], or using special empirical formulas; some of them (thirteen dependences) we gave in [33].

Provided that the average flow width  $B \gg h$  and  $R \cong h$ , instead of the hydraulic radius  $R$ , the dependencies (6) may include the average flow depth  $h$ :  $C = f(n, h)$ . Some dependencies entering the group (6) may also include the water surface slope  $S_f$  as an additional parameter.

Among the formulas of the type of (6) used to calculate the Chézy roughness coefficient values we have to mention the well-known and frequently cited in literature pieces the Manning, Guanguillet-Kutter, Forchheimer, and Pavlovskii formulas [1, 3, 4, 29, 33]. These formulas are now the most common to compute the Chézy coefficient  $C$  in various applications. They can be applied for both mountain and plain rivers, both small and medium or large rivers, rivers with earthen or indelible channels. Most of them are considered to be acceptable when values of the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$  range from 0.011 (for example, these are closed conduits flowing partly full uncoated or concrete culvert with bends, connections, and some debris, lined or built-up channels with a smooth concrete trowel finish, etc. [1]) to 0.04 (including excavated or dredged and not maintained channels with a clean bottom and brush on the side, as well as natural plain streams, mostly clean, but with some weeds and stones, including floodplains with light brush and trees in summer, and mountain streams, no vegetation in channels with gravels, cobbles, and few boulders in their bottom [1]), and values of the hydraulic radius  $R$  range from 0.1 to 5.0 m [33]. Some dependencies may be used even in cases where the roughness coefficient  $n$  values reach as much as 0.2 (for example, these are mountain rivers with extremely high resistance with channels composed of boulders or floodplains with trees, dense willows in summer [1]), and the hydraulic radius  $R$  values up to 20.0 m [33]. In turn, when estimating the roughness coefficient values, if necessary, it may be taken into account river channel geometry features including meandering and cross-section shape; water-surface profile; roughness because of friction within river bed and due to bank sediments, debris and sediment transport; roughness attributable to vegetation, ice cover, natural and artificial obstructions, and other flow-retarding factors in channels and floodplains.

The second group of explicit formulas, those we defined and systemised, consists of fourteen dependencies in which the Chézy roughness coefficient values are determined based on the relationship (2) between the Chézy coefficient  $C$  and the Darcy-Weisbach friction factor  $\lambda$ .

In general, there can be two sorts of roughness influencing the Darcy-Weisbach friction factor  $\lambda$  as the integral characteristic of hydraulic resistance to flows in river channels [33]. The first sort of roughness in terms of the hydraulic resistance to flows in river channels relates to the micro-roughness characterised by the height of protrusions of roughness  $\Delta$  depending on the size of the bottom fractions of sediments. With taking into account this sort of roughness, the Chézy roughness coefficient  $C_{\Delta}$  is established, which is determined as a function of the height of protrusions of roughness  $\Delta$  and hydraulic radius  $R$ :

$$C_{\Delta} = f(\Delta, R). \quad (7)$$

In particular, among the formulas of the type of (7) used to calculate the Chézy roughness coefficient  $C_{\Delta}$  values it should be noted the Strickler, Colebrook-White and Williamson formulas [19, 20, 23, 28, 33]. The formulas of the type of (7) are usually used to compute the Chézy roughness coefficient for mountain and foothill, mostly small and medium-sized rivers, which have practically non-erosion gravel-pebble, pebble-boulder channels.

The second sort of roughness in terms of the hydraulic resistance to flows in river channels relates to the macro-roughness characterized by the size (the height  $h_r$  and length  $l_r$ ) of the bottom ridges (riffles, dunes, etc.) and other similar channel formations. With taking into account this sort of roughness, the Chézy roughness coefficient  $C_r$  is established, which is determined as a function of the height  $h_r$  and length  $l_r$  of the bottom ridges, and hydraulic radius  $R$  :

$$C_r = f(h_r, l_r, R). \quad (8)$$

Among the formulas of the type of (8) used to calculate the coefficient  $C_r$  values it can be noted the Knoroz, Snischenko, and Sterenlicht-Polad-zade formulas [33, 39-42]. However, the formulas of the type of (8) have been developing mainly for large canals and plain rivers, where there are conditions to exist of the bottom ridge phase of sediment movement.

In exceptional cases, if we need to take into account the micro- and macro-roughness simultaneously the Chézy coefficient can be written as [33, 39, 40, 42]:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{C_\Delta^2} + \frac{1}{C_r^2}. \quad (9)$$

Instead of the hydraulic radius  $R$ , the dependencies (7), (8) may include the average flow depth  $h$ :  $C_\Delta = f(\Delta, h)$ ,  $C_r = f(h_r, l_r, h)$ . The height of protrusions of the roughness  $\Delta$  of a channel is usually equated to the average diameter  $d$  of soil particles making up the bottom and banks of a river channel:  $\Delta = d$  [33]. It should also be noted that formulas of the types of (7) and (8) do not include the hydraulic slope  $S_f$ ; however, some formulas of the type of (7) include the Reynolds number  $Re$ .

In general, the dependencies of the type of (7) and especially ones of (8) do not have wide applications in practice. However, they can be successfully used for estimating hydraulic resistance within gauged river sections, where detailed field research is conducted on a regular basis [33, 45].

The third group of explicit formulas, those we singled out and analysed [33], involves six special dependencies to compute the Chézy coefficient values taking into account the effect of the water surface slope  $S_f$  and hydraulic radius  $R$  :

$$C = f(S_f, R). \quad (10)$$

Practice shows that it is especially important to pay attention to the hydraulic slope while assessing the hydraulic resistance characteristics in the case of unstable river channels and variability of floodplain morphological characteristics. Usually, the hydraulic resistance to flow in open river channels keeps changing due to the variability of seasonal hydraulic and hydro-morphological conditions. Sometimes, these changes occur unpredictably. At the same time, the purposeful monitoring of the water surface slope enables taking into account the influence of various hydro-

morphological factors on hydraulic resistance within river sections where conditions change dynamically. Altogether, the hydraulic slope may be considered a kind of an indirect integral hydraulic resistance characteristic. In particular, the main feature of formulas of the type of (10) is that they contain neither the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$ , nor micro- and macro-roughness parameters used to define the Darcy-Weisbach friction factor  $\lambda$ . On the contrary, the water surface slope  $S_f$  is often used as one of the key parameters in some empirical formulas to calculate the roughness coefficient  $n$  (Bray's, Jarrett's, Sauer's formulas [25, 33]).

Among the formulas of the type of (10) used to compute the Chézy coefficient values it should be noted Matachievitch's, Winkel's, and Altshuhl-U-Van Thein's formulas [33, 44]. As well, provided that the average flow width  $B \gg h$  and  $R \cong h$ , instead of the hydraulic radius  $R$ , the dependencies (10) may include the average flow depth  $h$ :  $C = f(S_f, h)$ .

Currently, formulas of the type of (10) do not have wide applications in practice. Their usage scope is limited to partial cases, mostly such as earthen canals and canalized rivers, small and medium, foothill and plain rivers with relatively stable self-regulating channels. There are also some restrictions relating to values of the hydraulic slope  $S_f$ , hydraulic radius  $R$  (or average flow depth  $h$ ), and average flow width  $B$ . However, we consider using the dependencies of the type of (10) as a promising approach to computing the Chézy coefficient in gauged rivers, including monitored rivers by means of modern GNSS technology applications. One of key advantages of the approach seems that the accuracy of the water surface slope determination depends mostly on the accuracy of water level measurements being carried out instrumentally and, usually, with relatively high accuracy [33]. This can minimise the influence of human errors while monitoring the water surface slope. Accordingly, being the simplest element in terms of direct measurements of the river flow [33], the ongoing water level measurements can provide a quite reliable underpin to compute the Chézy coefficient properly with using dependencies of the type of (10).

The fourth group of explicit formulas we generalized as:

$$C = f(B, R), \quad (11)$$

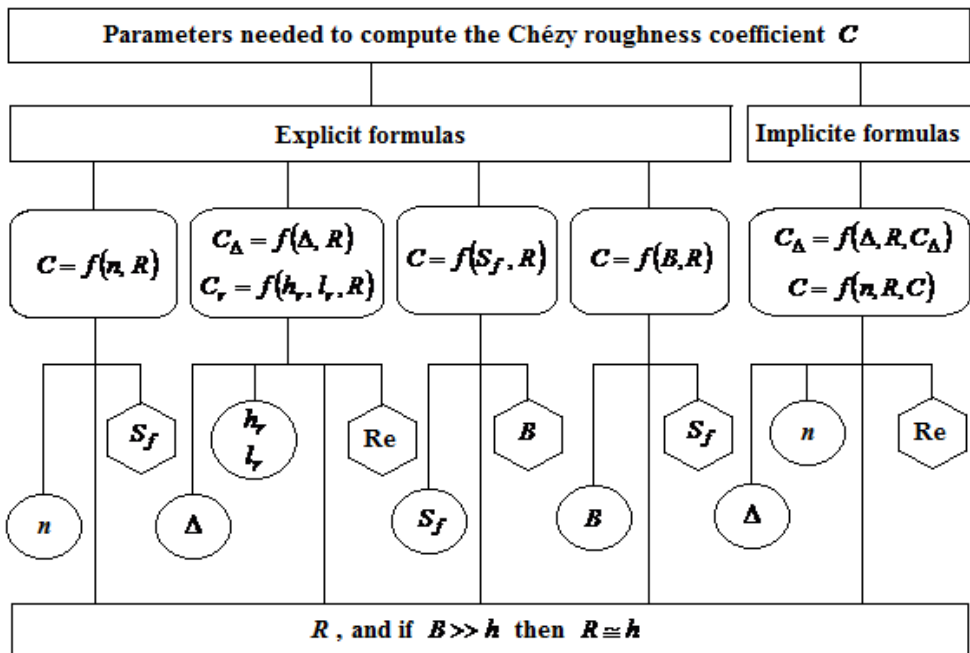
where  $R$  is the hydraulic radius,  $B$  is the average flow width.

These are formulas, where the ratio  $(B/R)$  is used to take into account the shape of a river channel cross-section in terms of determining the hydraulic resistance to open flow [39, 42]. Therefore, these formulas can also be summarised as [33]:  $C = f(B/R)$ . We found only four similar formulas that can be attributed to the group (11). Often, in practical applications, a uniform open flow with an arbitrary cross-sectional shape is reduced to a flat flow with the average flow depth  $h$ . Then, instead of the hydraulic radius  $R$ , the dependencies (11) may include the average flow depth  $h$ :  $C = f(B, h)$ .

Among the implicit formulas, those we analysed and systemised [33], the most common are formulas of the type of  $C_\Delta = f(\Delta, R, C_\Delta)$ . In particular, these are the Colebrook-White [23, 46], Thijse [47], and Powell [1, 29] formulas. Being derived

from the Darcy-Weisbach friction factor  $\lambda$ , these dependencies involve also the Reynolds number  $Re$  as an additional parameter. Among the implicit formulas, where the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$  and hydraulic radius  $R$  are used, we might recommend the Agroskin-Zheleznyakov equation [39]. It is a formula of the type of  $C = f(n, R, C)$ . Moreover, provided that the average flow width  $B \gg h$  and  $R \cong h$ , instead of the hydraulic radius  $R$ , the average flow depth  $h$  may also be used:  $C_{\Delta} = f(\Delta, h, C_{\Delta})$ ,  $C = f(n, h, C)$ .

Below, Fig. 3 shows the results of our examination of relationships between the Chézy roughness coefficient  $C$  and main parameters needed to compute it.



Parameters:  $n$  is the Gauckler-Manning roughness coefficient;  $S_f$  is the water surface slope;  $R$  is the hydraulic radius;  $B$  is the average flow width;  $h$  is the average flow depth;  $\Delta$  is the height of protrusions of roughness;  $h_r$  is the height and  $l_r$  is the length of the bottom ridges (riffles, etc.);  $Re$  is the Reynolds number

Fig. 3. Flow-chart showing the relationships between the Chézy roughness coefficient  $C$  and main hydro-morphological parameters needed to compute it

According to Fig. 3, the different parameters needed to compute the Chézy roughness coefficient may be divided into two characteristic groups. The first group consists of special parameters presented in formulas of a certain type. These are, for example, the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$ , height of protrusions of roughness  $\Delta$ , water surface slope  $S_f$ , and the average flow width  $B$ . In the flow-chart (Fig. 3), the circles highlight the key parameters presented in all formulas of a certain type, the pentagons – additional ones, which are only used in some formulas of a certain type. The second group includes the hydraulic radius  $R$  or, provided that

$B \gg h$ , the average flow depth  $h$ . One of these parameters is required in all formulas to compute the Chézy coefficient, regardless of their type.

While choosing an appropriate formula for calculating the Chézy roughness coefficient, we should take into account the availability and quality of information about all parameters and focus on the formulas with special parameters whose values are less questionable. Further, depending on flow conditions and factors affecting hydraulic resistance in the river channel section under study, we can choose the best formula of a certain type. If necessary, we can also focus on more detailed research on a special parameter fitting most to solve the task.

In general, as practice shows, regardless of area research, methods and tasks, in modelling and making decisions under data uncertainty, it is important to consider all available information [7, 48-53]. This allows you to implement a comprehensive and holistic approach to solving the problem. Taking into account all available information can be especially useful at the stage of preliminary research, when priorities have not been yet sufficiently identified. Engaging all available information can be useful in data analysis and their arrangements, as well as in modelling, computing of model parameters, and in decision-making processes, including final decision-making stages.

Supporting the comprehensive and holistic approach to hydraulic resistance research, we propose performing the Chézy coefficient calculations using an artificial neural network (ANN). Among the priority tasks needed preliminary solving to achieve that we consider the problem of correct data arrangements to train an ANN. In this research, we tried solving the problem of correct data arrangements to train ANNs being elaborated to calculate the Chézy coefficient on the example of an ANN of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function. The main purpose of the study was to develop general rules for the formation of training and test data samples when creating ANNs to compute the Chézy coefficient under parametric uncertainty. To achieve the aim of the study, the following main objectives were set and carried out: (1) generalization of the problem relating to computing the Chézy roughness coefficient, including defining and studying of the subject area; (2) data processing and analysis relating to key parameters defining the Chézy roughness coefficient values; (3) modelling of the ANN to compute the Chézy roughness coefficient, opting of the ANN components and its structure; (4) supervised learning (training and testing) of the proposed ANN with processing examples based on using sets of paired inputs and desired outputs learning; (5) analysis of obtained results with detecting challenges and difficulties relating to computing the Chézy roughness coefficient values by means of the proposed ANN, and outlining ways of their overcoming.

### **3. Materials, methods, main assumptions, and constrictions of the study**

This study keeps a continuation of our previous work [33]. There, on the basis of different pieces of literature, we reviewed, analysed, and systematised a wide set of the well-known and frequently cited empirical and semi-empirical formulas and dependencies, which might be used to compute the Chézy roughness coefficient in cases of open river channels taking into account application limits in term of hydro-morphological conditions. In order to clarify some of the problematic issues related to the use of the reviewed formulas, we have more carefully revised pieces of classical literature on open channel hydraulics [1, 3, 4], reference books, tutorials,

and manuals [24, 25, 39-42], articles highlighting the results of original research on estimating hydraulic resistance [2, 19-23, 26, 27, 30-32, 34, 36, 37, 43, 44], including materials of articles devoted to the peculiarities of computing the Chézy roughness coefficient values [28, 29, 35, 46, 47], as well as publications on mathematical modelling of uniform and non-uniform water flow in open channels [7-14, 16-18]. In total, we analysed more than 40 different formulas that can be used while the Chézy roughness coefficient calculating, and revealed the specifics of the use of different formulas depending on the available data, limitations and conditions of their practical applications. In addition, there was studied the problem of the origin, propagation, estimation, and overcoming of the uncertainty of the parameters included in these formulas and hydraulic models [48, 49, 51, 53, 54]. In particular, this research allowed clarifying the tasks of defining and studying the subject area (1), and data processing and analysis relating to key parameters defining the Chézy roughness coefficient values (2).

When researching, we used different methods within the holistic approach to the problem under study [55-59]: historical method; method of dialectical cognition and generalised scientific methods of theoretical and empirical research; heuristic methods; methods of analysis and synthesis; methods of expert evaluation and comparison; methods of formalization and modelling. Moreover, we used modern methods of intelligent data analysis [60, 61], methods of decision making under uncertainty [7, 49, 50, 52, 62], as well as methods and models of artificial intelligence, including ones relating to development and application of ANNs to solve various application problems [63-72].

This article is devoted to solving the problem of correct data arrangements and the development of general rules for the formation of training and test samples of data to train ANNs being planned to be elaborated to compute the Chézy roughness coefficient taking into account the parametric uncertainty of data on the hydro-morphological factors and parameters characterizing the hydraulic resistance in open river channels. The problem is solved on the example of an ANN of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function. The training of the ANN and its testing is planned to be carried out taking into account the following hydro-morphological parameters: the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$  and water surface slope  $S_f$ ; the average flow width  $B$  and depth  $h$ ; the height of protrusions of roughness  $\Delta$  and hydraulic radius  $R$ . It is assumed that multicollinearity between the parameters  $n$ ,  $S_f$ ,  $B$ ,  $\Delta$ ,  $h$ , and  $R$  is absent or can be neglected. Taking into account the relationships between the Chézy coefficient and the defining parameters (Fig. 3), samples of input variables  $(x_1, x_2)$  are prepared. Using them, the ANN, according to the algorithm shown below in Fig. 4, calculates the Chézy coefficient  $C = f(x_1, x_2)$  as a dependent variable, where,  $x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}$  and  $x_2 \in \{h, R\}$  are considered as independent variables. As a result, the ANN of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function performs approximation of continuous  $C = f(x_1, x_2)$  functions. The training of the ANN is carried out on the learning samples  $(x_1, x_2, C)$  using the method of inverse error propagation [65].

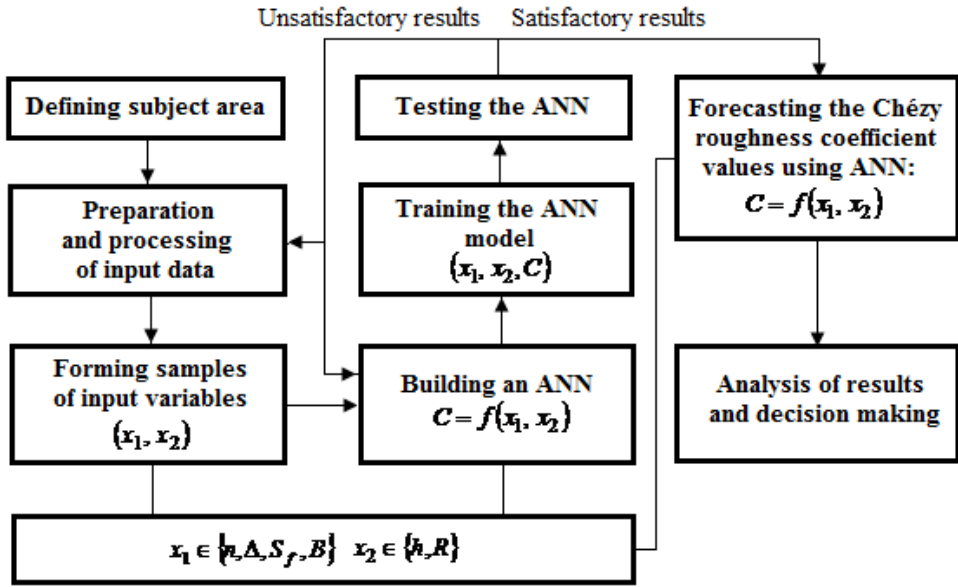


Fig. 4. Flow-chart showing the algorithm of computing the Chézy roughness coefficient  $C$  values by means of the ANN under study

To train and test the ANN, a limited amount of field data on hydro-morphological characteristics was used. They related to two channel sections on the Dnieper River (within the city of Kyiv and downstream of Kyiv), the Desna River section near Chernihiv, and the Pripjat River section near the town of Turiv. These areas are characterized by a straight earthen channel with a simple cross-sectional shape and calm current (the Froude number,  $Fr \ll 1$ ). Training and testing the neural network was carried out within the following limits of change of hydro-morphological parameters: the water discharge  $Q = 48.8 \div 3665.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ; the average flow velocity  $V = Q / A = 0.336 \div 0.968 \text{ m/s}$ , where  $A$  is the cross-sectional area of the flow ( $\text{m}^2$ ); the water surface slope  $S_f = 0.000036 \div 0.00016$ ; the average flow depth  $h = 1.0 \div 6.2 \text{ m}$ ; the average flow width  $B = 122.0 \div 611.0 \text{ m}$ ; the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n = 0.027 \div 0.045$ ; the Chézy roughness coefficient  $C = 27.0 \div 48.1$  (Table 1). Field data regarding these hydro-morphological parameters were taken from the Hydrological Yearbooks of the Central Geophysical Observatory named after Boris Sreznevsky [73].

Table 1 – Hydro-morphological data used in the ANN training and testing

Rivers, channel sections	$Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$A$ ( $\text{m}^2$ )	$B$ ( $\text{m}$ )	$h$ ( $\text{m}$ )	$S_f \cdot 10^3$	$n$ ( $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ )	$C$ ( $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ )
Dnieper, Kyiv (training)	545.1	1125	375	3.0	0.045	0.029	41.8
	1433	1768	393	4.5	0.067	0.028	46.7
	1842	1988	398	5.0	0.074	0.027	48.1
Dnieper, Kyiv (testing)	1082	1551	388	4.0	0.060	0.028	45.2
	787.2	1336	382	3.5	0.052	0.028	43.6



Rivers, channel sections	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$B$ (m)	$h$ (m)	$S_f \cdot 10^3$	$n$ (s/m <sup>1/3</sup> )	$C$ (m <sup>1/2</sup> /s)
Dnieper, downstream of Kyiv (training)	657.4	1956	575	3.4	0.046	0.045	27.0
	1123	2403	586	4.1	0.054	0.040	31.4
	3665	3787	611	6.2	0.079	0.031	43.7
Dnieper, downstream of Kyiv (testing)	1763	2858	595	4.8	0.063	0.036	35.6
	2601	3320	604	5.5	0.071	0.033	39.7
Desna, Chernihiv (training)	188.0	501.8	125	4.0	0.036	0.041	31.1
	249.4	580	129	4.5	0.040	0.040	32.2
	403.7	742.4	135	5.5	0.046	0.039	34.2
	497.5	826.3	138	6.0	0.049	0.038	35.1
Desna, Chernihiv (testing)	321.2	660.3	132	5.0	0.043	0.039	33.3
Pripyat, Turiv (training)	48.8	122	122	1.0	0.16	0.032	31.6
	89.0	195.4	130	1.5	0.128	0.033	32.9
	248.6	437.3	146	3.0	0.087	0.034	35.1
Pripyat, Turiv (testing)	136.3	273	136	2.0	0.109	0.033	33.8
	189.7	353.8	142	2.5	0.097	0.034	34.5

In order to correctly use the actual data for training and testing the ANN, they were normalised. Numerical data were converted in such a way as to obtain their model values varying in the range between 0 and 1. In particular, for the purpose of normalization, the parameter  $B$  was replaced with a ratio  $S_f \cdot B \cdot h^{-1}$  [74]. Instead of parameters  $V$ ,  $h$ ,  $C$ , model characteristics  $V \cdot 10^{-2}$ ,  $h \cdot 10^{-2}$ ,  $C \cdot 10^{-2}$  were considered. Parameters  $S_f$  and  $n$  remained unchanged. Training data samples consisted of normalized values of the characteristics obtained with uniform linear interpolation in the vicinity of the observed values of parameters. The observed values that were used as test examples were not included in the training samples.

#### 4. The ANN used in the study

##### 4.1. The ANN architecture

Usually, a multilayer direct propagation ANN (a multilayer perceptron) with a nonlinear activation function to approximate continuous functions is used. Such a neural network is considered as a hierarchical structure in which neurons are structured in layers. In a fully connected ANN, each neuron in one its layer is connected to all neurons in its next layer. Neurons of the input layer in such networks transmit input signals to the first hidden layer without converting them. In hidden neurons, sequentially, layer by layer, there is a nonlinear conversion of signals. Each network neuron produces a weighted sum of its inputs, passes this value through the activation function and gives the output value. Signals from the last hidden layer arrive at the neurons of the output layer, which eventually form the ANN response [63-65, 67, 71, 72].

In practice, it is often used one or two hidden layers [64, 65]. It is known that the perceptron with even one hidden layer is a very powerful computing system [63]. In turn, an additional hidden layer can significantly increase the complexity of calculations, processing time, and the risk of the ANN retraining [71, 72, 75].

The ANN we used to compute the Chézy roughness coefficient  $C = f(x_1, x_2)$  is a fully connected direct propagation neural network with one hidden layer. The network has 2 inputs, 4 neurons in its hidden layer and 1 neuron in its output layer. Examples of similar networks are given in [63-65, 71, 72, 75].

Fig. 5 shows the neural network architecture as a set of such blocks: the input layer that receives the parameters  $(x_1, x_2)$  values and transmitting them (without conversion) to the next layer neurons; the weight matrix  $W^1 = \{w_{ij}^{(1)}, i = \overline{1,2}, j = \overline{1,4}\}$  containing the weight values of inputs for the all hidden layer neurons; the hidden layer containing four neurons, each of which calculates the weighted sum  $s_j = \sum_{i=1}^2 x_i \cdot w_{ij}^{(1)}, j = \overline{1,4}$  of its inputs, conducts the sum value through the activation function  $F(s_j)$ , and transmits the resulting value to the next layer; the weight matrix  $W^2 = \{w_{ij}^{(2)}, i = \overline{1,4}, j = 1\}$  containing the weight values of relationships of the each hidden layer neuron with the output neuron; the output layer containing one neuron in which the weighted sum of its inputs is calculated and the Chézy roughness coefficient value is determined:  $C = \sum_{i=1}^4 F(s_i) \cdot w_{ij}^{(2)}, j = 1$ .

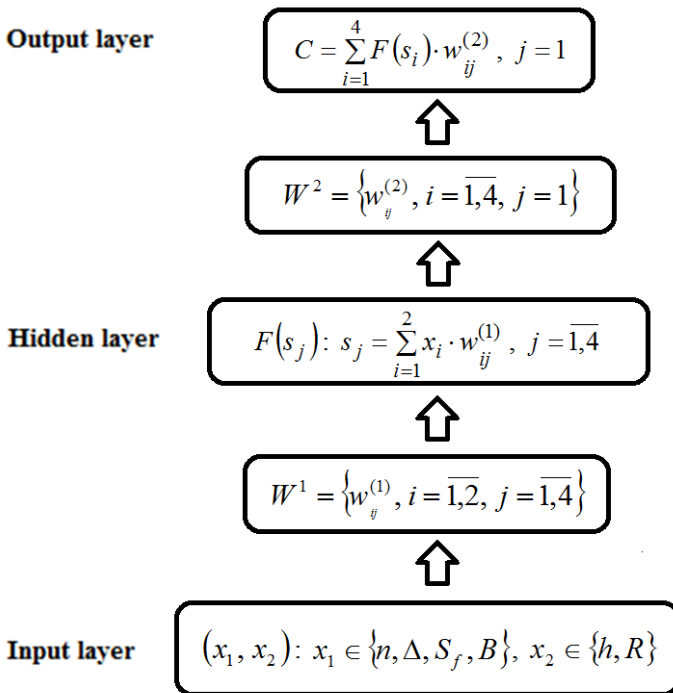


Fig. 5. Flow-chart showing the architecture of the ANN under study

The ANN uses a direct propagation network model with a linear source neuron; the sigmoid (logistic) activation function is applied to the neurons of the hidden layer [64, 65]:

$$F(s) = \frac{1}{1 + e^{-\beta \cdot s}}, \quad (12)$$

where the parameter  $\beta$  influences the steepness of the transition.

The advantage of the function (12) is a quite convenient expression of its first derivative [64, 65]:

$$F'(s) = \beta \cdot F(s)(1 - F(s)), \quad (13)$$

that allows effectively using different algorithms for the ANN learning, where, in turn, parameter  $\beta$  (in our case study  $\beta = 1$ ) allows amplifying weak signals and adjusting the learning speed of the network.

#### 4.2. The ANN algorithm to compute the Chézy roughness coefficient values

According to the proposed ANN architecture (Fig. 5) and the recommendations [65], the following algorithm for computing the Chézy roughness coefficient  $C$  was developed. It consists in gradually calculations of the outputs of all neurons  $y_j^{(1)}$  and  $y^{(2)}$  in the network in the direction from the first to the last layer of neurons performed by parameter  $(x_1, x_2)$  values and weight matrices  $W^1, W^2$ ; the neuron of the output layer forms the result of the network work as [65]:

$$y_j^{(1)} = F(s_j), \quad s_j = \sum_{i=1}^2 x_i \cdot w_{ij}^{(1)}, \quad j = \overline{1,4}, \quad (14)$$

$$y^{(2)} = \sum_{i=1}^4 y_i^{(1)} \cdot w_{ij}^{(2)}, \quad j = 1, \quad C(x_1, x_2) = y^{(2)}, \quad (15)$$

where  $y_j^{(1)}, j = \overline{1,4}$  are output values of the hidden layer neurons,  $F(s_j)$  is the neuron activation function (12),  $x_i$  is an input parameter,  $w_{ij}^{(1)}$  are weight coefficients of connections of each input layer neuron with all neurons of the hidden layer,  $w_{ij}^{(2)}$  are weight coefficients of connections of each hidden layer neuron with the neuron of the output layer,  $y^{(2)}$  is the ANN output value.

#### 4.3. The ANN training

The Python object-oriented programming environment [70-72, 76] was applied to build and train the neuron network (Fig. 5). The ANN training was carried out by adjusting the weights of connections between neurons of all its layers using the

inverse error propagation algorithm [64, 65]. The learning factor was assumed to be 0.01. The software implementation of the computational algorithm for learning of the ANN being created to predict the Chézy coefficient  $C$  is given in [77].

The ANN weight coefficients were adjusted on a series of real case examples of the parameters  $(x_1, x_2)$  values, where  $x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}$ , and  $x_2 \in \{h, R\}$ , in such a way as to achieve a reduction in the error between the predicted (computed)  $C_p$  and observed (reference)  $C_o$  values of the Chézy coefficient  $C$ . The Chézy roughness coefficient reference  $C_o$  values were calculated on actual data of hydrological observations with the Chézy formula as:

$$C_o = \frac{Q_o}{A \cdot \sqrt{R \cdot S_f}}, \quad (16)$$

where  $Q_o$  is the observed water discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $A$  is the cross-sectional area of the flow ( $\text{m}^2$ ),  $R$  is the hydraulic radius:  $R \cong h$  as  $B \gg h$ ,  $B$  is the average flow width (m),  $h$  is the average flow depth (m),  $S_f$  is the water surface slope.

The initial values of the weight coefficients were set randomly, near to zero. At each iterative step (epoch in learning), at the ANN entrance, in turn, training examples were input and the output values of the neural network were computed, which were further compared with the reference values with error estimating. The network error was also calculated for the hidden layer neurons. The obtained error values were used to recalculate weight coefficients according to the inverse error propagation algorithm [64, 65, 71, 72]. Then, the transition to the next learning epoch was made or, when the required number of epochs was performed or the computational error amounted to an acceptable value the algorithm was stopped.

The ANN learning algorithm includes the following sequence of steps implemented in the program code of the Python module *C\_ANN\_training.py* [77]:

1. Initialization of the ANN parameters.
2. Direct course of calculations.
3. The reverse course of calculations.
4. Checking the ANN training adequacy.
5. Storage of the ANN learning outcomes.

The proposed computational algorithm implements the classical approach to learning multilayer neural networks using the method of inverse error propagation [63-65, 67, 72, 78]. Herein, the number of learning epochs, the value of learning speed, the amount of learning error, the number of neurons in the hidden layers of the network, etc. are selected by the developer (expert) empirically applying a trial-and-error procedure. Further, the ANN training results are used in predicting the values of the Chézy coefficient  $C$  by means of a computer program developed on Python (See, the Python module *C\_ANN\_calculating.py* [77]).

#### 4.4. The ANN testing

The ANN testing was carried out according to the actual data of hydro-morphological observations (Table 1), which were not used in the network training.

The testing procedure consisted of a comparison of the actual (observed, gauged)  $Q_o$  and forecasted (predicted)  $Q_p$  water discharge values:

$$Q_p = C_p \cdot A \sqrt{R \cdot S_f}, \tag{17}$$

where  $C_p$  is the predicted (computed by means of the ANN) Chézy roughness coefficient value (Table 2).

Table 2 – The identified (observed) and computed (predicted) Chézy coefficient  $C$  values

Rivers, channel sections	The Chézy roughness coefficient values (m <sup>1/2</sup> /s):	
	$C_o$ , calculated (identified) with the formula (16)	$C_p$ , computed by means of the ANN
Pripyat, Turiv	45.0308	36.8622
Pripyat, Turiv	35.4731	36.8624
Desna, Chernihiv	33.1753	36.8632
Dnieper, Kyiv	33.8147	36.8623
Dnieper, Kyiv	39.6453	36.8624
Dnieper, downstream of Kyiv	43.6760	36.8622
Dnieper, downstream of Kyiv	34.4313	36.8623

Table 3 shows the actual (observed, gauged) and forecasted (predicted) water discharge values, as well as absolute and relative errors of discharge forecasts performed using the tested ANN.

Table 3 – The actual (observed) and forecasted (predicted) water discharges

Rivers, channel sections	Discharges (m <sup>3</sup> /s)		Absolute errors (m <sup>3</sup> /s)	Relative errors (per cent)
	observed, $Q_o$	predicted, $Q_p$		
Pripyat, Turiv	136.3	148.0	11.7	8.6
Pripyat, Turiv	189.7	203.8	14.1	7.4
Desna, Chernihiv	321.2	356.7	35.5	11.1
Dnieper, Kyiv	787.2	664.9	122.3	15.5
Dnieper, Kyiv	1082.0	886.3	195.7	18.1
Dnieper, downstream of Kyiv	1763.0	1830.8	67.8	3.8
Dnieper, downstream of Kyiv	2601.0	2419.9	181.1	7.0

To assess the forecast (predictive) skill of the ANN the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient ( $NSE$ ) was used [79]. At present, this criterion is widely applied for assessment of the predictive power of hydrological models [80].

In our case study, the  $NSE$  coefficient was calculated as:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^7 (Q_{o,i} - Q_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^7 (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}, \quad (18)$$

where  $Q_{o,i}$ ,  $Q_{p,i}$  are observed and predicted values of water discharges for a river channel section  $i$ ,  $i = \overline{1,7}$ ;  $\bar{Q}_o$  is the mean of the observed discharges  $Q_{o,i}$ .

It is thought, in the situation of a perfect model with an estimation error variance equal to zero, the resulting Nash-Sutcliffe Efficiency equals 1 ( $NSE = 1$ ). Values of the  $NSE$  nearer to 1, suggest a model with more predictive skill.

In our case study the  $NSE = 0.9818$ . It can signify the forecast (predictive) skill of the ANN is quite high.

Moreover, we used an application of  $NSE$  in regression procedures (i.e. when the total sum of squares can be partitioned into error and regression components). Herein, the Nash-Sutcliffe efficiency ( $NSE_r$ ) is considered equivalent to the coefficient of determination ( $R^2$ ). Fig. 6 shows the graphical illustration of the  $NSE_r$  assessing. Its value confirms the high predictive skill of the ANN as well.

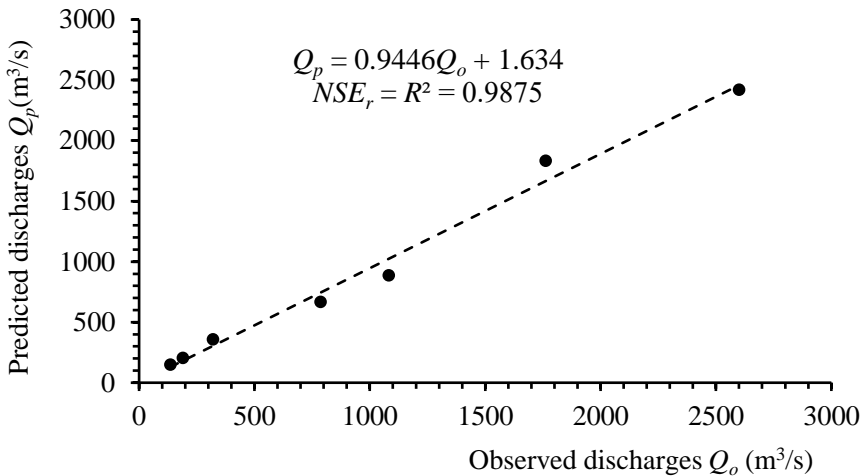


Fig. 6. The graphical illustration of the Nash-Sutcliff model efficiency criterion  $NSE_r$  assessment

It should be noted, the  $NSE$  coefficient is sensitive to extreme values and might give sub-optimal results when the dataset contains large outliers. Usually, some subjective threshold indicating that the model can be objectively accepted or rejected based on the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient is the  $NSE = 0.3$ .

## 5. Discussion

Predicting the Chézy roughness coefficient values to present the hydraulic resistance to open flows in river channels is a complex challenge burdened by parametric uncertainty of data relating to hydro-morphological parameters. There is also the methodological uncertainty connecting with opting for an appropriate empirical

dependency among lots of different empirical and semi-empirical formulas involving various parameters. One of the most promising approaches to overcome such a kind of uncertainty might be the use of artificial neural networks (ANNs). However, this approach needs preliminary solving of the problem on correct data arrangements to train ANNs being developed, taking into account all available information on influential parameters determining the hydraulic resistance, especially in cases as the necessary data are not reliable enough, as well as incomplete, and ambiguous ones.

To study the problem of applying neural networks to predict the Chézy coefficient values using empirical and semi-empirical formulas and dependencies taking into account the parametrical uncertainty of the necessary data, we examined an ANN of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function. The ANN testing results indicate the prospects of using such networks in predicting the empirical characteristics of hydraulic resistance to open flows in river channels within certain limitations and applications.

First of all, they confirm that the proposed (not overtrained) neural network of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function computing the Chézy coefficient  $C = f(x_1, x_2)$  in terms of input variables  $(x_1, x_2)$ , where  $x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}$ , and  $x_2 \in \{h, R\}$ , can forecast (predict) only some averaged values of the  $C$  within a chosen subject area (including rivers, channel sections, and variation of hydro-morphological parameter values) (Fig. 7).

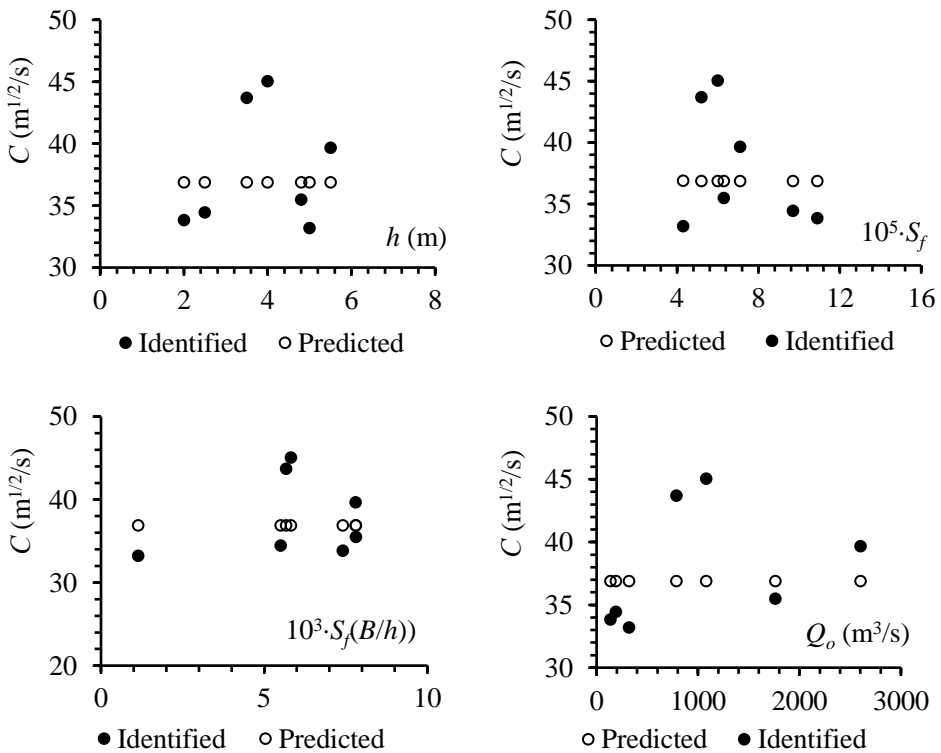


Fig. 7. The Chézy coefficient  $C$  values: predicted (computed) by means of the ANN, and identified (calculated) with the formula (16) according to data of hydrological observations

Herein, according to the results of the ANN testing, the prediction relative error of the Chézy coefficient  $C$  values depending on the river and the channel section varied from 3.9 to 18.1 percent. Its average value was 10.3 percent.

It should be noted, similar values of the prediction relative error were also recorded for water discharges computed by means of the ANN (See above Table 3). It ranged from 3.8 to 18.1 per cent, and on average was 10.2 per cent. At the same time, the predictive skill of the ANN checked according to the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient ( $NSE$ ), occurred to be high enough ( $NSE = 0.9818$ ). In general, this may indicate that the proposed neural network is able to predict the Chézy coefficient values with sufficient accuracy in terms of practice, provided the correct arrangements of data relating to the subject area. For example, an appropriate hierarchy of data arrangements may include a certain type of a river, its separate channel section with a certain type of fluvial-morphological process [74] and other hydro-morphological peculiarities of river channels [1-4], as well as acceptable variation of hydro-morphological parameter values including seasons, etc. There are also wide opportunities to advance to further improve the neural network. For example, it is possible to apply an ANN with more hidden layers [65-68, 75], as well as combinations of different activation functions for different layers of neurons, including genetic algorithms for approximate computing of initial values of weight matrices, etc. [64-72, 75]. In addition, an ensemble of neural networks can be used to increase the approximation accuracy of the Chézy roughness coefficient output values in conditions of parametric uncertainty of data relating to hydro-morphological characteristics [65, 67], combining several separate neural networks into an ANN with a common architecture.

## Conclusions

1. Developed were general rules to the arrangements and the formation of training and test samples of data needed to create ANNs aimed to compute the Chézy roughness coefficient taking into account the parametric uncertainty of findings regarding the hydro-morphological factors and parameters characterizing the hydraulic resistance to flows in river channels. The study was performed on the example of an ANN of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function. The training of the ANN and its testing was carried out on the actual data related to several channel sections on the Dnieper River (within the city of Kyiv and downstream of Kyiv), the Desna River channel section near Chernihiv, and the Pripyat River channel section near the town of Turiv.

2. To achieve the aim of the study, the following objectives were set and carried out: (1) generalization of the problem relating to computing the Chézy roughness coefficient, including defining and studying of the subject area; (2) data processing and analysis to provide correct their arrangements in computing the Chézy roughness coefficient values by means of ANNs; (3) modelling of an ANN to compute the Chézy roughness coefficient, including opting of the ANN components and its structure; (4) supervised learning (training and testing) of the proposed ANN by processing examples based on using a set of paired inputs and desired outputs learning; (5) analysis of obtained results with detecting challenges and difficulties relating to computing the Chézy roughness coefficient values by means of the proposed ANN and outlining ways of their overcoming.



3. The algorithm of calculating the Chézy coefficient  $C$  as a dependent variable  $C = f(x_1, x_2)$  was developed, where,  $x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}$  and  $x_2 \in \{h, R\}$  were considered as independent variables (predictors) representing such parameters as the Gauckler-Manning roughness coefficient  $n$ , height of protrusions of roughness  $\Delta$ , water surface slope  $S_f$ , average flow width  $B$ , average flow depth  $h$ , and hydraulic radius  $R$ . The training of the ANN was carried out using the method of inverse error propagation.

4. The ANN testing was performed on a comparison of the observed (gauged)  $Q_o$  and computed (predicted)  $Q_p$  water discharges. To assess the forecast (predictive) skill of the ANN, the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient ( $NSE$ ) was used. We suppose the value of  $NSE = 0.9818$  might signify the quite high predictive skill of the ANN. The prediction relative error of water discharges ranged from 3.8 to 18.1 per cent; on average, it was 10.2 per cent.

5. According to the results of the ANN testing, the prediction relative error of the Chézy coefficient  $C$  depending on rivers and channel sections varied from 3.9 to 18.1 percent. Its average value was 10.3 percent. Thereby, it was established that the proposed (not overtrained) neural network of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function computing the Chézy coefficient  $C = f(x_1, x_2)$  can forecast (predict) only some averaged values of the  $C$  within a chosen subject area (including different rivers, channel sections, and variation of hydro-morphological parameters). It was shown that the proposed ANN is able to predict the Chézy coefficients with sufficient accuracy for practice, provided the correct arrangements of data relating to the subject area.

## REFERENCES

1. Chow, V.T. (1959). Open-channel hydraulics. N.Y., McGraw-Hill, 680 p.
2. Leopold, L.B., Bagnold, R.A., Wolman, M.G., and Brush, L.M., jr. (1960). Flow resistance in sinuous or irregular channels. Physiographic and hydraulic studies of rivers. Geological survey professional paper 283-D. <https://pubs.usgs.gov/pp/0282d/report.pdf>.
3. French, R.H. (1986). Open-channel hydraulics. N.Y., McGraw-Hill, 705 p.
4. Sturm, T.W. (2001). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, N.Y., 493 p.
5. Mujumdar, P.P. (2001). Flood wave propagation. Reson 6, 66–73; doi: <https://doi.org/10.1007/BF02839085>.
6. Cao, Z. and Carling, P. A. (2002). Mathematical modelling of alluvial rivers: reality and myth. Part I: General review. Proc. of the Institution of Civil Engineers Water & Maritime Engineering, 154, Issue 3, 207–219.
7. Veksler, A.B., Ivashintsov, D.A., and Stefanishin, D.V. (2002). Reliability, social and environmental safety of hydraulic structures: risk assessment and decision making. St. Petersburg: VNIIG B.E. Vedeneeva, 591 p. [in Russian].
8. Liang, D., Falconer, R.A., and Lin, B. (2007). Linking one- and two-dimensional models for free surface flows. Water Management, Vol. 160, Issue 3, 145–151; doi: <https://doi.org/10.1680/wama.2007.160.3.145>.
9. Nikishov, V.I. (2007). From hydraulics of open streams to hydromechanics of river systems. Applied hydromechanics, Vol. 9, No. 2-3, 103–121 [in Russian].
10. Churuksaeva, V., Starchenko, A. (2015). Mathematical modeling of a river stream based on a shallow water approach. Procedia Computer Science, 4th Int. Young Scientists Conf. on Computational Science, Vol. 66, 200–209; doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.11.024>.

11. 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](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_Users_Manual.pdf).
12. Kasvi, E., Alho, P., Lotsari, E., Wang, Y., Kukko, A., Hyypä, H., and Hyypä, Yu. (2014). Two-dimensional and three-dimensional computational models in hydrodynamic and morphodynamic reconstructions of a river bend: sensitivity and functionality. *Hydrological Processes*, Pub. online in Wiley Online Library; doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.10277>.
13. Khodnevich, Y.V., and Stefanyshyn, D.V. (2014). Mathematical modelling the conditions of intensification of the riverbed local erosion behind of obstacle that deviates from the shore downstream. *Zeszyty Naukowe Inżynieria Łądowa i Wodna w Kształtowaniu Środowiska*, Nr 10, Kalisz, 7–18.
14. Qin, X., Motley, M., LeVeque, R., Gonzalez, F., and Mueller, K. (2018). A comparison of a two-dimensional depth-averaged flow model and a three-dimensional RANS model for predicting tsunami inundation and fluid forces. *Natural Hazards Earth System Sci.*, 18, 2489–2506; doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2489-2018>.
15. Dyakonova, T., and Khoperskov, A. (2018). Bottom friction models for shallow water equations: Manning's roughness coefficient and small-scale bottom heterogeneity. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 973; doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/973/1/012032>.
16. Two-Dimensional Hydraulic Modeling for Highways in the River Environment. Ref. Document. (2019). Publ. No. FHWA-HIF-19-061, U.S. Department of Transportation, FHWA, 301 p. Available from <https://portal.ct.gov/-/media/DOT/documents/ddrainage/2-D-Hydraulic-Modeling-Reference-Document.pdf>.
17. Gordillo, G., Morales-Hernández, M., and García-Navarro, P. (2019). Finite volume model for the simulation of 1D unsteady river flow and water quality based on the WASP. *Journal of Hydroinformatics*, 22.2, 327–345; doi: <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.080>.
18. Delis, A.I., and Nikolos, I.K. (2021). Shallow Water Equations in Hydraulics: Modeling, Numerics and Applications. *Water* 2021, 13, 3598; doi: <https://doi.org/10.3390/w13243598>.
19. Fenton, J.D. (2010). Calculating resistance to flow in open channels. *Alternative Hydraulics Paper 2*. Available from <http://johndfenton.com/Alternative-Hydraulics.html>.
20. Zidan, A.R.A. (2015). A review of friction formulae in open channel flow. *International Water Technology Journal*, Vol. 5, No. 1, 43–57.
21. Wang, W.-J., Peng, W.-Q., Huai, W.-X., Katul, G.G., Liu, X.-B., Qu, X.-D., and Dong, F. (2019). Friction factor for turbulent open channel flow covered by vegetation. *Scientific reports*. 9:5178; doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41477-7>.
22. Zeghadnia, L., Robert, J. L., and Achour, B. (2019). Explicit solutions for turbulent flow friction factor: A review, assessment and approaches classification. *Ain Shams Engineering Jour.*, 10, 243–252; doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.10.007>.
23. Bacoțiu, C. (2020). The quest for the ideal Darcy-Weisbach friction factor equation from the perspective of a building services engineer. *Ovidius University Annals Series: Civil Engineering*, Vol.21, No.1, 65–73; doi: <https://doi.org/10.2478/ouacsce-2019-0008>.
24. Arcement, G.J., and Schneider, V.R. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. United States Geological Survey, Water-supply Paper 2339; doi: <https://doi.org/10.3133/wsp2339>.
25. Coon, W.F. (1998). Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks. Prepared in cooperation with the New York State Department of Transportation, 133 p.
26. Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., and Piroton, M. (2009). Bottom friction formulations for free surface flow modeling, Proc. of the 8th NCTAM Congress, Brussels. Available from <http://hdl.handle.net/2268/28208>.
27. Dash Saine S., Khatua, K.K., Naik, B., and Mohanty, P.K. (2013). Energy loss for a highly Meandering open Channel Flow. *Research J. of Eng. Sciences*. Vol. 2 (4), 22–27.
28. Jiménez-Medina, O. (2015). Fórmulas generales para los coeficientes de Chézy y de Manning. *Water Technology and Sciences*, 6 (3), 33–38 [in Spanish].

29. Achour, B. (2015). Chezy's Resistance Coefficient in a Rectangular Channel. *Journal of Scientific Research & Reports*, 7(5), 338–347.
30. Stewart, M.T., Cameron, S.M., Nikora, V.I., Zampiron, A., and Marusic, I. (2019). Hydraulic resistance in open-channel flows over self-affine rough beds. *J. of Hydraulic Research*, 57:2, 183–196; doi: <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1473296>.
31. Kalinin, A.V. (2019). Dependence of the Chezy coefficient on Froude number. *Bulletin of Science and Education of North-West Russia*, Vol. 5, №3, 19 p. [in Russian].
32. Zhu, X., Liu, B., and Liu, Y. (2020). New Method for Estimating Roughness Coefficient for Debris Flows. *Water*, 12, 2341; doi: <https://doi.org/10.3390/w12092341>.
33. 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; doi: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.16-43>.
34. Jones, G.M., Sanks, R.L., Tchobanoglous, G., and Bosserman, B.E. (2006). *Pumping Station Design: Revised 3rd Edition*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2855 p.
35. Strupczewski, W.G., Szymkiewicz, R. (1996). Analysis of paradoxes arising from the Chezy formula with constant roughness: I. Depth-discharge curve. *Hydrological Sciences Jour.*, 41:5, 659–673; doi: <https://doi.org/10.1080/02626669609491537>.
36. Gioia, G., and Bombardelli, F.A. (2001). Scaling and Similarity in Rough Channel Flows. *Physical Review Letters*, 88 (1): 014501; doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.014501>.
37. Gioia, G., and Chakraborty, Pinaki. (2006). Turbulent Friction in Rough Pipes and the Energy Spectrum of the Phenomenological Theory. *Physical Review Letters*. 96 (4): 044502; doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.044502>.
38. 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; doi: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2019.1.16-27>.
39. Zheleznyakov, G.V. (1981). *Throughput ability of channels of canals and rivers*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 311 p. [in Russian].
40. Shterenlicht, D.V. (1984). *Hydraulics*. Moscow, Energoatomizdat, 640 p. [in Russian].
41. Baryshnikov, N.B. (2003). *Hydraulic resistance of river channels*. Tutorial. St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University, 147 p. [in Russian].
42. Baryshnikov, N.B. (2016). *Channel flow dynamics*. St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University, 342 p. [in Russian].
43. Khatua, K.K., Patra, K.C., and Nayak, P. (2011). Meandering effect for evaluation of roughness coefficients in open channel flow. *River Basin Management VI. WIT Trans. on Ecology and the Environment*, Vol. 146, 213–224; doi: <https://doi.org/10.2495/RM110191>.
44. Altshul, A.D., U-Van Thein. (1973). Comparison of formulas without roughness coefficient for determining the average water flow velocity in rivers. *Hydrotechnical construction*, No 1, 41–42 [in Russian].
45. 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; doi: <https://doi.org/10.22630/ASPA.2020.19.1.12>.
46. Giustolisi, O. (2004). Using genetic programming to determine Chézy resistance coefficient in corrugated channels. *Journal of Hydroinformatics*, 06.3, 157–173.
47. Loukam, I., Achour, B., Djemili, L. (2018). Chezy's resistance coefficient in an egg-shaped conduit. *Journal of Water and Land Development*, No. 37, 87–96; doi: <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0028>.
48. Peggy A. Johnson, P.A. (1996). Uncertainty of Hydraulic Parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, Is. 2; doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:2\(112\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:2(112)).
49. 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.

50. Kuhn, M., Johnson, K. (2013). *Applied Predictive Modeling*. Springer Science + Business Media: New York, 600 p.
51. Oubennaceur, H., Chokmani, K., Nastev, M., Tanguy, M., and Raymond, S. (2018). Uncertainty Analysis of a Two-Dimensional Hydraulic Model. *Water*, 10, 272; doi: <https://doi.org/10.3390/w10030272>.
52. Trofymchuk, O.M, Bidiuk, P.I., Prosiankina-Zharova, T.I., Terentiev, O.M. (2019). Decision support systems for modelling, forecasting and risk estimation. Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing, 176 p.
53. Ahmadi, A., Nasserli, M., and Solomatine, D.P. (2019). Parametric uncertainty assessment of hydrological models: coupling UNEEC-P and a fuzzy general regression neural network. *Hydrological Sciences Journal*, 64:9, 1080–1094, doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1610565>.
54. McIntyre, N., Wheeler, H., and Lees, M. (2002). Estimation and propagation of parametric uncertainty in environmental models. *Jour. of Hydroinformatics*, 04.3, 177–198.
55. Amini, A. (2001). The Holistic Approach to Development Research. *Journal of Interdisciplinary Economics*. 2001; 12 (4): 375–394; doi: <https://doi.org/10.1177/02601079X00001200404>.
56. Brunner, W., and Urenje, S. (2012). The Parts and the Whole: A Holistic Approach to Environmental and Sustainability Education. Visby: Swedish Int. Centre of Education for Sustainable Development. Ecoprint, Tartu, Estonia, 73 p.
57. Vojinovic, Z. (2015). *Flood Risk: The Holistic Perspective (Urban Hydroinformatics)*. IWA Publishing; 1st edition, 270 p.
58. Shwetzer, C., Maritz, A. and Nguyen, Q. (2019). Entrepreneurial ecosystems: a holistic and dynamic approach. *Journal of Industry – University Collaboration*, Vol. 1, No. 2, P.P. 79-95. doi: <https://doi.org/10.1108/JIUC-03-2019-0007>.
59. Altman, M. (2020). A holistic approach to empirical analysis: The insignificance of P, hypothesis testing and statistical significance. In D.H. Bailey, N.S. Borwein, R.P. Brent, R.S. Burachik, J.H. Osborn, B. Sims, and Q.J. Zhu (Eds.). *From Analysis to Visualization: A Celebration of the Life and Legacy of J.M. Borwein*, Callaghan, Australia, September 2017. Springer Verlag. Vol. 313, 233–253; doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36568-4\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36568-4_16).
60. Berthold, M.R., Borgelt, Ch., Höppner, F., and Klawonn, F. (2010). *Guide to Intelligent Data Analysis: How to Intelligently Make Sense of Real Data*. London: Springer-Verlag, 407 p; doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-260-3>
61. Combs, J.P., and vonWuegbuzie, A.J. (2010). Describing and illustrating data analysis in mixed research. *International Journal of Education*, Vol. 2, No. 2: E13; <https://hdl.handle.net/20.500.11875/2951>.
62. 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.
63. Cybenko, G.V. (1989). Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and Systems*. Vol. 2, No. 4, 303–314.
64. Rutkovskaya, D., Pilinsky, M., Rutkovsky, L. (2004). Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems. Moscow, Telecom, 452 p. [In Russian].
65. Haikin, S. (2008). *Neural Networks and Learning Machines (3rd Edition)*, Prentice Hall, 906 p.
66. Russell, S.J., and Norvig, P. (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3rd ed. Pearson Education, Inc.: Upper Saddle River, New Jersey, 1132 p.
67. Adamenko, V. and Mirskykh, G. (2012). Artificial neural networks in problems of material objects implementation. Part 2. Design and application specifics, *Bulletin of the National Technical University of Ukraine “KPI”*, Series – Radio Engineering, Kiev, № 48, 213–221 [In Ukrainian].
68. *Artificial Neural Networks – Architectures and Applications*. (2013). Edited by Kenji Suzuki. Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. 256 p; doi: <http://dx.doi.org/10.5772/3409>.

69. Piotrowski, A.P., Osuch, M., Napiorkowski, M.J., Rowinski, P.M., and Napiorkowski, Ja.J. (2014). Comparing large number of metaheuristics for artificial neural networks training to predict water temperature in a natural river. *Computers & Geosciences*, Vol. 64, 36–151; doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.12.013>.
70. Muller, A., and Guido, S. (2016). *Introduction to Machine Learning with Python*, Published by O'Reilly Media, 378 p.
71. Chollet, F. (2018). *Deep Learning with Python*. Manning Publications Co., 384 p.
72. Trask, A.W. (2019). *Grokking Deep Learning*. Manning Publications Co, 336 p.
73. Central Geophysical Observatory named after Boris Sreznevsky. Available from <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/index.php?lang=en&dv=main>.
74. Khodnevykh, Y.V., Stefanyshyn, D.V., Korbutiak, V.M. (2017). Simulation modeling of condition for initiation of local riverbed erosion. *Environmental safety and natural resources*. Issue 24 (3-4), 112–123 [In Ukrainian].
75. Keim, R. (2020). How Many Hidden Layers and Hidden Nodes Does a Neural Network Need? Available from <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-many-hidden-layers-and-hidden-nodes-does-a-neural-network-need/>
76. Lutz, M. (2013). *Learning Python*. Fifth Edition. Printed in the United States of America. Published by O'Reilly Media, Inc., 1540 p.
77. Khodnevykh, Ya. (2022). The software implementation of a neural network computational algorithm for predicting the Chézy roughness coefficient. Available from [https://github.com/yakhodnevykh/ANN\\_approximation\\_C](https://github.com/yakhodnevykh/ANN_approximation_C).
78. Novotarskyi, M.A., and Nesterenko, B.B. (2004). Artificial neural networks: calculations. *Proceedings of the Institute of Mathematics of the NAS of Ukraine*, Vol. 50. 408 p. [In Ukrainian].
79. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290; doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
80. Ritter, A., Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480 (1), 33–45; doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>.

*The article was received 21.02.2022 and was accepted after revision 31.05.2022*

**Я.В. Ходневич, Д.В. Стефанишин**  
**ПІДГОТОВКА ДАНИХ ДЛЯ НАВЧАННЯ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТА ШОРСТКОСТІ ШЕЗІ ЗА УМОВИ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР ТЕЧІЇ В РУСЛАХ РІЧОК**

*Анотація.* Гідравлічні розрахунки та математичне моделювання відкритих течій у руслах річок досі залишаються одними з найактуальніших гідротехнічних задач сучасності з точки зору практики. При їх розв'язуванні, незалежно від теми та мети дослідження, використаних методів тощо, зазвичай приймається та застосовується ряд спрощень та припущень. Крім того, існує низка методологічних, структурних і параметричних невизначеностей, подолання яких вимагає складних емпіричних попередніх досліджень. Перш за все, ці невизначеності стосуються оцінки гідравлічних опорів та встановлення їх чисельних характеристик, які залежать від багатьох факторів, що змінюються в просторі та в часі.

Однією з найбільш популярних інтегральних емпіричних характеристик, що виражають гідравлічний опір відкритим потокам у руслах річок, є коефіцієнт шорсткості Шезі  $S$ . На даний момент існує велика кількість емпіричних і напівемпіричних формул і залежностей для розрахунку коефіцієнта Шезі. Однак, незважаючи на велику кількість емпіричних і напівемпіричних формул і залежностей для його розрахунку, ідеального способу чи методу для однозначного визначення цієї емпіричної характеристики не існує. З одного боку, щоб вибрати відповідну формулу

для розрахунку коефіцієнта Шезі, ми повинні приймати до уваги практичний досвід, заснований на комплексному аналізі варіантів, розглядати різні емпіричні рівняння, які альтернативно використовуються для представлення гідравлічного опору відкритим потоком. З іншого боку, суттєву роль може відігравати повнота та комплексність польових досліджень численних гідроморфологічних факторів і параметрів, що характеризують різні аспекти гідравлічного опору відкритим потоком. Зокрема, оцінка точності обчислення коефіцієнта Шезі за польовими даними, незважаючи на методи та формули, свідчить про те, що точність польових вимірювань параметрів, що входять до обраних формул, значною мірою визначає відносну похибку таких розрахунків.

У цій статті розглядається проблема упорядкування даних та розробки загальних правил формування навчальних і тестових вибірок даних для навчання штучних нейронних мереж, які розробляються для обчислення коефіцієнта Шезі з урахуванням параметричної невизначеності даних про гідроморфологічні фактори та параметри, що характеризують гідравлічний опір у руслах річок. Задача вирішується на прикладі штучної нейронної мережі прямого поширення з одним прихованим шаром і сигмоподібною логістичною функцією активації.

**Ключові слова:** штучні нейронні мережі; коефіцієнт шорсткості Шезі; підготовка даних; гідравлічний опір у руслах річок; параметрична невизначеність

#### **Ходневич Ярослав Васильович**

кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5510-1154> **e-mail:** ya.v.khodnevych@gmail.com

#### **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

## ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION RESOURCES AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 502/504

**Oleg I. Gerasymov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of the Academy of High School of Ukraine, Head at the Department of General and Theoretical Physics

ORCID ID: 0000-0003-2999-9834 *e-mail*: gerasymovoleg@gmail.com

**Liudmyla M. Sidletska**, graduate student of the Department of General and Theoretical Physics

ORCID ID: 0000-0002-1458-011X *e-mail*: milapolonskaa@gmail.com

Odesa State Environmental University, Odesa, Ukraine

### HYDROSTATIC PRESSURE IN GRANULAR ENVIRONMENT

***Summary.** The problem is that to date there is no general theory of the granular state of matter in a closed form. However, there are some well-developed models that use, for example, the representation of a continuous environment. Typical bulk material is a large conglomeration of micro-mechanical particles of different sizes and shapes that interact with each other and the walls contain containers by mainly repulsive forces in direct mechanical contact (by nature it is forces of electromagnetic origin – dry and viscous friction forces, as well as traction).*

*In the proposed work to study the pressure in a multiparticle micro-mechanical system, a model of a lattice gas in a gravitational field is considered. Analysis of the determination of free energy and entropy allowed us to establish the corresponding equilibrium density profile, which is described by a Fermi-type function. The Fermi profile in the form of a density field was used to find the vertical hydrostatic pressure for which the analytical expression was obtained. Hydrostatic pressure was different from the known relations derived from the theory of condensed matter. The obtained results are confirmed by experimental observations, which indicate a complex, anisotropic significantly different from the known from the theory of condensed matter distribution of even vertical pressure in large conglomerations of discrete micro-mechanical particles. Which really repeats the Fermi distribution. The obtained results stimulate the revision of typical ratios of hydrostatics of continuous media, such as Pascal's laws. Torricelli, Archimedes and Bernoulli in the case of discrete micro-mechanical (granular) systems. The conclusions of the work can be significant in the design and evaluation of operating parameters of storage, release and transportation of bulk cargo, which consist of discrete micro-mechanical conglomerations with different degrees of compaction and compaction.*

***Keywords:** conical slot hopper (silo); pressure in granular systems; lattice gas in gravitational field; density field; configuration entropy; hydrostatics of granular medium*

О.І. Герасимов, Л.М. Сідлецька

Одеський державний екологічний університет, м. Одеса, Україна

## ГІДРОСТАТИЧНИЙ ТИСК В ГРАНУЛЬОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

***Анотація.** Проблема на сьогодні, що загальної теорії гранульованого стану речовини в замкнутому вигляді не існує. Тим не менш, існують і досить розвинені деякі моделі, що використовують, наприклад, уявлення суцільного середовища. Типовий сипкий матеріал являє собою велику конгломерацію мікромеханічних частинок різної величини і форми, що взаємодіють між собою і стінами вміщаючої ємності за допомогою головним чином сил відштовхування при прямому механічному контакті (за природою це сили електромагнітного походження – сили сухого і в'язкого тертя, а також зчеплення).*

*У пропонуваній роботі для вивчення тиску у багаточастинковій мікромеханічній системі розглянута модель граткового газу у гравітаційному полі. Аналіз визначення вільної енергії та ентропії дозволив встановити відповідний рівноважний профіль густини, який описується функцією типу Фермі. Знайдений результат у вигляді Фермі-профілю поля густини було використано для знаходження вертикального гідростатичного тиску, для якого отримано аналітичний вираз. Гідростатичний тиск виявився відмінним від відомих співвідношень, які впливають з теорії конденсованого стану. Отримані результати підтверджуються експериментальними спостереженнями, які свідчать про складний, анізотропний, суттєво відмінний від відомих з теорії конденсованих систем розподіл навіть вертикального тиску у великих конгломераціях дискретних мікромеханічних частинок, який дійсно повторює риси розподілу Фермі. Отримані результати стимулюють перегляд типових співвідношень гідростатики суцільних середовищ, таких, наприклад, як закони Паскаля, Торрічеллі, Архімеда та Бернуллі у випадку дискретних мікромеханічних (гранульованих) систем. Висновки роботи можуть бути суттєвими при конструюванні і оцінці робочих параметрів ємностей збереження, вивільнення та транспортування сипучих вантажів, які складаються з дискретних мікромеханічних конгломерацій із різними ступенями ущільнення та компактності.*

***Ключові слова:** тиск в гранульованих системах; гратковий газ в гравітаційному полі; поле густини; конфігураційна ентропія*

**DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.86-95>**

### Вступ

Гранульовані матеріали (ГМ) використовуються в промисловості, в технологіях із різних галузей промисловості, а також і в побуті майже в тих самих глобальних масштабах, як і рідини. Прикладом таких матеріалів є звичайний пісок з його різноманітним практичним застосуванням. Вражає, що незважаючи на масштабне прикладне значення, властивості (фізичні, механічні, структурні) гранульованих матеріалів до недавнього часу системно практично не вивчалися. Але, вже приблизно років 20–30 тому, фізики "раптом" усвідомили, що звичайний пісок є абсолютно вражаючим, з точки зору його незвичайних властивостей, матеріалом. А саме, за деяких умов він може поводитися і як тверде тіло, і як рідина, і як газ [1–4]. Причому кожна, умовно кажучи, "фаза" має унікальні властивості, що суттєво відрізняють



гранульовані матеріали від відомих агрегатних станів конденсованої речовини. Уявімо собі, є контейнер з піском, який збурюється зовнішнім полем, скажімо, віброприскорювань незначної амплітуди. Енергія цього руху передається через границі контейнеру окремим частинкам-гранулам. В результаті при досягненні певного рівня збудження вся маса гранульованого матеріалу приходить до стану руху і починає розвивати власну специфічну динаміку. Якщо гранульований матеріал розмістити на похилій площині, при деякому куті нахилу речовина починає текти, демонструючи, так би мовити, властивості рідини. При цьому взаємодії гранул між собою мають абсолютно відмінну від випадку рідини природу. Між гранулами взагалі не діють сили притягання, а сили відштовхування, які спрацьовують лише при контактах частинок, в загальному випадку, є непружними (дисипативними і нелінійними за природою, як, наприклад, сила тертя).

Серед багатьох специфічних властивостей, які показують гранульовані матеріали, помітне місце займає розподіл тиску в них. Це питання, зокрема, відіграє важливу роль в технологіях конічних бункерів зберігання та дозування ГМ (навантаження та розвантаження), так званих силосів, які широко використовуються в технічних галузях. При конструюванні різного виду таких пристроїв необхідно знати розподіл тиску, як вздовж їхніх стінок (горизонтальний тиск), так і в напрямку випускного отвору (вертикальний тиск). Для розробки відповідних технічних засобів маніпулювання ГМ та технологій їх використання важливо мати разом із чисельними розв'язками задачі також і її аналітичний розв'язок.

Наразі проблема полягає в тому, що досі не існує послідовної теорії ГМ, яка б дозволила провести необхідні розрахунки і здійснити оцінки відповідних параметрів гранульованих (сипучих) середовищ. Тому розгляд аналітичних моделей формування тиску в таких системах залишається актуальною задачею.

На теперішній час поширеною у використанні моделлю розподілу тиску у сипучих середовищах прийнято вважати відому модель Янсена [1]. Детальний аналіз цього підходу, який базується на феноменологічному визначенні вертикального і горизонтального тиску та їх постульованої пропорційності, наведений, наприклад, в [2]. В нашій роботі ми зосередимося на визначенні вертикального тиску в мікромеханічних системах з невеликим профілем поля густини. З цією метою буде використана модель ґраткового газу у гравітаційному полі, яка дозволяє отримати відповідний профіль поля густини в аналітичному вигляді.

## **1 Гідростатичний тиск в гранульованих системах**

У даній роботі під гранульованим матеріалом будемо розуміти речовину, що складається з великої конгломерації дискретних частинок різних розмірів і форми, які взаємодіють між собою і стінами ємності за допомогою електромагнітних та сил сухого і в'язкого тертя. Якщо ж електромагнітні та сили в'язкого тертя відсутні, а проявляються лише сили сухого тертя, то такий стан речовини будемо називати ідеальним станом гранульованого матеріалу.

Розглянемо насип ідеального гранульованого матеріалу, деякої висоти  $H$ , що знаходиться в циліндричній ємності, як показано на рис. 1.

В цьому випадку можна виділити два умовних характерних напрямки: вертикальний, що збігається з напрямком дії сили тяжіння, і горизонтальний, перпендикулярний до сили тяжіння.

Під рівноважним станом гранульованого матеріалу будемо розуміти такий, в якому всі його частини знаходяться в рівновазі і спокої (імпульс будь-якого виділеного елемента дорівнює нулю). Під стаціонарним станом будемо розуміти такий стан, при якому всі його частини рухаються з постійною швидкістю, залишаючись при цьому в рівновазі із оточенням (імпульс будь-якого виділеного елемента не залежить від часу).

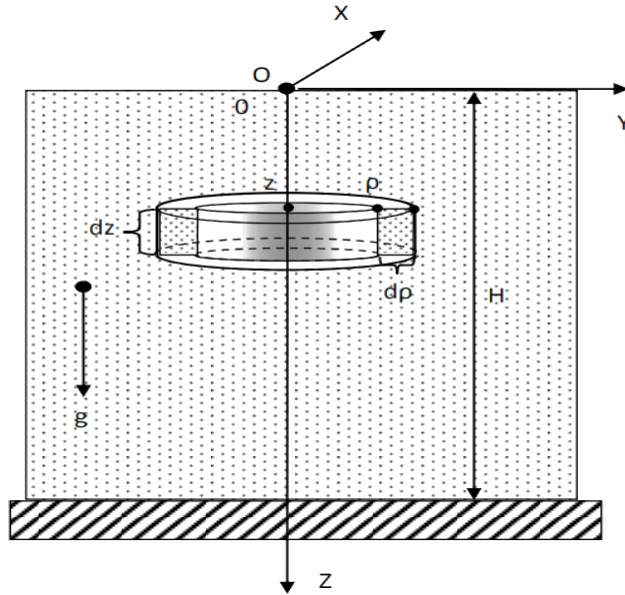


Рис. 1. Скетч-схема визначення параметрів задачі

Згідно із конструкцією задачі, в масі гранульованого матеріалу існує розподіл тиску на вертикальну і горизонтальну компоненти  $P_z$  і  $P_p$ , які у випадку гранульованого матеріалу априорі не дорівнюють один одному, як у випадку ідеальної рідини (закон Паскаля). Ми сфокусуємося нижче на розгляді компонент тиску, які залежать від координат  $z$  і не залежать від координати  $\varphi$ .

Більше століття тому була запропонована елегантна модель для опису розподілу тиску у вертикальному контейнері, заповненому гранульованим матеріалом, який знаходиться у стані спокою. Скорочено опишемо модель, запропоновану в [1]. Знову розглянемо вертикальний циліндр радіусом  $R$ , заповнений частинками-гранулами у стані спокою (див. рис. 1). Метою є визначення тиску всередині матеріалу, який викликаний дією сили тяжіння, в залежності від глибини  $x$  (де вісь  $x$  – вісь циліндра, орієнтована вертикально донизу). Зауважимо, що визначення «тиску» у гранульованому середовищі є саме по собі складною задачею (див., наприклад, [2]). Рефракційна техніка подвійного заломлення дозволяє здійснювати спостереження за розподілом сил в об'ємі стиснутого гранульованого матеріалу. За допомогою такого інструментарію встановлено, що розподіл тиску є вельми складним і суттєво неоднорідним. В [1] було запропоновано ввести модель, яка оперує двома характерними тисками, які діють у вертикальному та у горизонтальному

напрямах (між двома горизонтальними та вертикальними площинами, відповідно). Спростуючи задачу, було зроблено припущення, що ці два тиски пропорційні один одному. Зосередимося на визначенні тиску, який діє між двома горизонтальними площинами. Для цього можна розглянути баланс сил, які діють на тонкий шматочок речовини товщиною  $dx$  і на глибині  $x$ , який перебуває у стані спокою. При визначенні таких сил зазвичай щільність системи покладається постійною. Між іншим, у випадку гранульованого середовища ця умова, як вже згадувалося вище, вочевидь порушується.

Покладемо, що вертикальна компонента тиску  $P_z$  і, відповідно, градієнт цієї компоненти вздовж осі  $OZ$  залежать від радіуса. Отже, на сусідні елементарні кільця (рис. 1) по вертикалі будуть діяти різні сили. Це призведе до того, що, наприклад, сусіднє до визначеного зовнішнє елементарне кільце буде зміщуватися вниз, а сусіднє внутрішнє кільце буде зміщуватися (щодо розглянутого елементарного кільця) вгору.

Тому сили сухого тертя, що діють на внутрішню і зовнішню бічну поверхню розглянутого елементарного кільця, будуть спрямовані в різні боки і результуюча сила буде визначатися градієнтом компоненти тиску  $P$ . На підставі вищенаведених нехай і якісних міркувань можна зробити висновок про те, що в сипучих (гранульованих) матеріалах, зокрема, не виконується закон Паскаля, який є типовим для звичайних рідин.

## 2 Впакування гранульованих матеріалів

Велику кількість своїх специфічних властивостей ГМ здатні показувати, зокрема, завдяки можливості зменшувати об'єм, який вони займають при зовнішніх збуреннях. Ущільнення ГМ, яке відбувається завдяки різноманітним зовнішнім впливам, надійно спостерігається як у чисельних експериментах, так і у теоретичних дослідженнях [3, 4]. Збурення гранульованих систем може призводити не тільки до ущільнення, тобто до зменшення об'єму, який займає система, а також до симетризації розподілу частинок у системі. Приклади такої симетризації наведені на рис. 2 (цитовано з [2]).

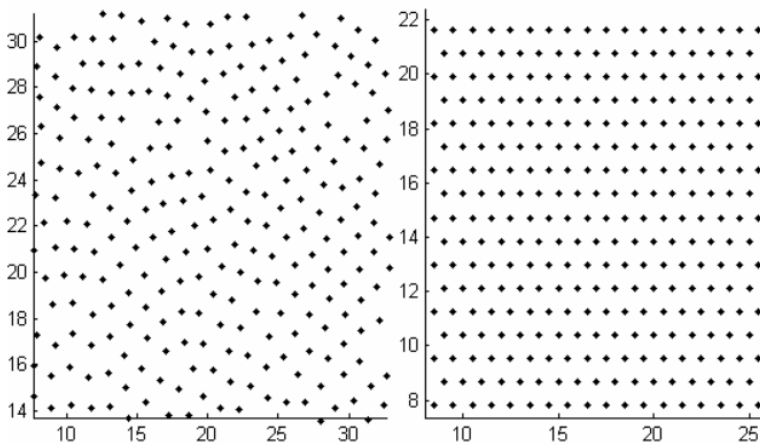


Рис. 2. Структуризація у двовимірних системах твердих дисків під впливом зовнішніх збурень (точки показані центри дисків). Ліворуч – неупорядкована структура; праворуч – структура із характерними ознаками симетризації та ущільнення [2]

На рис. 3 представлені структури, які зображені на рис. 2 та параметризовані в термінах так званих побудов Вороного (див. [3]). Метод Вороного, як бачимо, також дозволяє, окрім оцінки ступеня ущільнення, наочно спостерігати симетризацію у розподілі частинок, як про це свідчать дані, наведені на рис. 3.

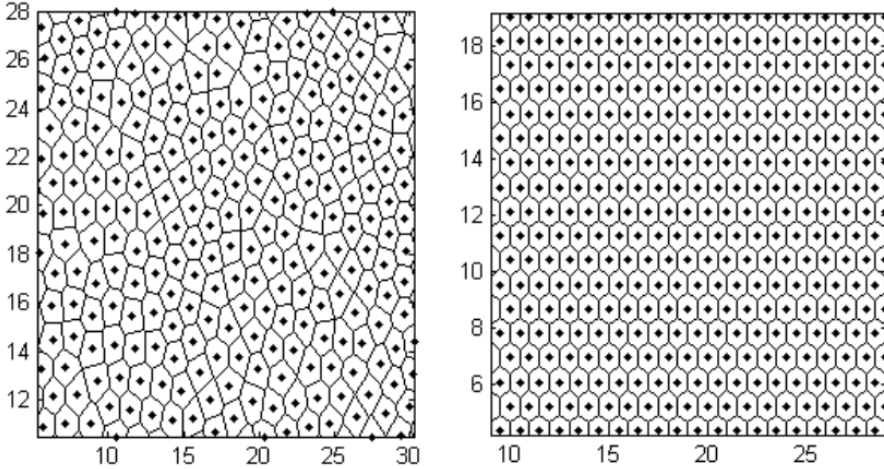


Рис. 3. Побудови Вороного для структур, які спостерігаються у гранульованих системах під впливом зовнішніх збурень. Ліворуч – початковий невпорядкований стан; праворуч – кінцевий симетризований стан, сформований в околі максимального впакування

Наведені на рис. 2 і 3 дані наштовхують на думку про можливість використання ґраткових моделей для вивчення, зокрема, поля густини (тиску) у гранульованих матеріалах. Теоретичний аналіз таких моделей та визначення шляхів їх застосування до параметризації феноменологічних даних про розподіл статичного тиску в природно анізотропних мікромеханічних (гранульованих) матеріалах становить, як вже згадувалося вище, нашу задачу.

### 3 Вільна енергія, ентропія і профіль густини в ґратковому газі у гравітаційному полі

В рамках квазістатистичного підходу (див. [3]) запишемо загальний вираз для вільної енергії системи, яка буде об'єктом розгляду у вигляді функціоналу:

$$F(p) = E(p) - \beta^{-1} S(p), \tag{1}$$

де енергія системи в гравітаційному полі  $E(p)$  дається виразом:

$$E(p) = mg \int_{(V)} zp(\vec{r}) d\vec{r}, \tag{2}$$

тут  $z$  – вертикальна координата,  $\beta^{-1}$  – зворотний масштаб енергії,  $p$  – густина,  $S$  – ентропія системи. З урахуванням викладеного в розд. 2, в якості виразу для  $S(p)$  скористаємося відомим співвідношенням для ентропії ґраткового газу ([4]):

$$S(p) = - \int_{(V)} dr \left\{ \frac{p}{p_0} \ln \frac{p}{p_0} + \left(1 - \frac{p}{p_0}\right) \ln \left(1 - \frac{p}{p_0}\right) \right\}, \quad (3)$$

тут  $p_0$  – максимальна густина системи.

Розрахунок варіаційної похідної  $\frac{\delta F(p)}{\delta p}$  з (1)–(3) породжує рівноважний профіль густини у формі розподілу, який описується функцією Фермі:

$$p(z) = \frac{p_0}{1 + e^{\gamma z}}, \quad \gamma = \frac{mgp_0}{\beta}, \quad (4)$$

де  $\beta$  – визначає масштаб енергії в системі.

Нижче ми проаналізуємо вертикальний тиск, який здійснює стовпчик гранульованої речовини, густина якої описується отриманим співвідношенням (4) для моделі ґраткового газу у гравітаційному полі.

#### 4 Вертикальний гідростатичний тиск в системах з Фермі-профілем густини

Вертикальний тиск  $P$  в системі з Фермі-профілем густини  $p(z)$  описується функцією (4), яка трансформується в (5):

$$p = \frac{p_0 m g z}{1 + e^{\gamma z}}. \quad (5)$$

Рівняння (5) визначає вертикальний тиск, який створюється над стовпчиком гранульованої речовини висотою  $z$  із Фермі-розподілом густини.

Таким чином, в розглянутій моделі тиск асимптотично зменшується із збільшенням вертикальної координати  $z$  за законом:

$$\sim p_0 m g z e^{-\gamma z}, \quad (6)$$

який вочевидь є відмінним від відомого барометричного закону:

$$p = p_0 m g e^{-\gamma z}. \quad (7)$$

Зауважимо, що розподіл (5) містить типову для Фермі-систем деталь, а саме, мілкомасштабну стадію зростання тиску (густини) для  $z < z_0$ , де  $z_0$  – корінь трансцендентного рівняння

$$-\log(\gamma z_0 - 1) = \gamma z_0. \quad (8)$$

Експериментальні дослідження розподілу тиску в гранульованих матеріалах (див. огляд в [5]) достовірно фіксують відхилення, зокрема у розподілі тиску, від класичних законів броунівського руху (у розріджених станах).

Як вже згадувалося, збуджене, скажімо, внаслідок вібраційного впливу гранульоване середовище (ГМ) демонструє велику кількість інтригуючих

фізичних властивостей [3, 4]. Причому, так як енергія впливу постійно додається в систему, в такій нерівноважній системі досягається стаціонарний стан [3, 4]. В [5] досліджені спектральні властивості вібраційно збудженого ГМ під дією сили тяжіння. Показано, що в режимі слабкого збудження динаміку частинок-гранул неможливо описати як простий рух броунівських частинок в достатньо розрідженому стані. На підставі останнього автори роблять висновок про те, що для того, щоб описати кооперативну дисипативну динаміку гранульованої конгломерації частинок, необхідно розвивати альтернативні підходи, наприклад, за допомогою концепції узагальнених частинок Ланжевена.

В експерименті [5] вертикальний розподіл 2-міліметрових куль зі стабілізованого оксиду цирконію досліджувався за допомогою лазерного обладнання у полі дії сили тяжіння. Відповідні вертикальні зміщення  $z(t)$  вимірювалися від верхньої частини контейнера шляхом налаштування вікна вимірювання в напрямку дії сили тяжіння. Було встановлено, що відповідна статистика (параметризована в термінах функції конфігураційного розподілу  $N$  частинок –  $\phi$ ) задовольняє закону Фермі (див. рис. 4 з [5]).

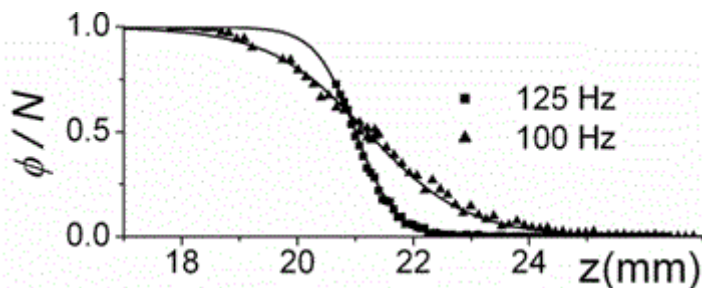


Рис. 4. Результат експериментального дослідження розподілу за вертикальними положеннями частинок гранульованої конгломерації висотою  $h = 21$  mm і інтенсивністю збудження  $\Gamma = 10$

Дані, наведені на рис. 4, наочно свідчать про Фермі-характер вертикального розподілу частинок-гранул у розрідженій системі і, таким чином, про порушення закону броунівського руху.

Ентропійний аналіз ґраткової моделі гранульованої системи, проведений вище, свідчить про те, що розподіл Фермі є також типовим і для густо впакованої гранульованої конгломерації, що порушує також відомі закони гідростатики (наприклад, закон Паскаля).

Тому розроблений вище теоретичний підхід є підґрунтям для подальшого поглибленого вивчення питання про розподіл тиску і встановлення аналогів гідростатичних законів в гранульованих середовищах.

### Висновки та перспективи подальших досліджень

За допомогою аналізу вільної енергії та ентропії у квазістатичному наближенні для моделі ґраткового газу у гравітаційному полі, яка моделює найпростішу мікромеханічну систему, знайдений вертикальний Фермі-профіль поля густини, який є відмінним від відомого больцманівського.

Використовуючи знайдений вираз, для поля густини розрахований вертикальний гідростатичний тиск, який має відмінності від класичного закону Паскаля у фізиці конденсованого стану.

Отримані результати дозволяють враховувати вищеописаний ефект в конструкціях ємностей збереження та дозування сипучих матеріалів, а також в технологіях геоморфологічного моніторингу мікромеханічних (гранульованих) середовищ [6].

Порівняння отриманих результатів з даними експериментів [5] з дослідження вертикальних розподілів частинок в розріджених гранульованих конгломераціях спонукають до попереднього висновку про універсальний характер розподілу вертикальної густини (тиску) у вигляді Фермі-розподілу для різних ступенів впакування дискретних мікромеханічних систем.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Janssen H. A. (1895) Versuch über Getreidedruck in Silozellen, *Zeitschrift des vereins Deutscher Ingenieure*. V. 39, N. 35. P. 1045–1049.
2. Boutreux, T., Raphaël E., and De Gennes P. G. (1997) Propagation of a pressure step in a granular material: The role of wall friction. *Physical Review E* vol. 55, N. 5 doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.5759>.
3. Герасимов О.І. Фізика гранульованих матеріалів. Одеса: ТЕС, 2016. 264 с.
4. Герасимов О.І., Співак А.Я. Окремі задачі фізики м'якої матерії : монографія / Одеськ. держ. еколог. ун-т. Одеса: Видавничий дім "Гельветика", 2020. 200 с.
5. Jorge E. Fiscina, Manuel O. Cáceres (2005) Fermi-like behavior of weakly vibrated granular matter. *Phys. Rev. Lett.* 95, 108003.
6. Gerasymov O.I., A. Ya. Spivak Parameterization of the local structure of micro-mechanical systems (granular materials). In: *The Bogolyubov Kyiv Conference "Problems of theoretical and mathematical physics"*, Kyiv, Ukraine, September 24–26, 2019 p. 73.
7. Samchenko, D. N., Kochetov G. M., & Vasiliev, A. (2020). Енергоощадна технологія переробки гальванічних шламів з одержанням радіопоглинаючих матеріалів. *Екологічна безпека та природокористування*, 35(3), 30–43. doi: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.30-43>.

Стаття надійшла до редакції 11.02.2022 і прийнята до друку після рецензування 17.05.2022

## REFERENCES

1. Janssen, H. A. (1895). Versuch über Getreidedruck in Silozellen. *Zeitschrift des vereins Deutscher Ingenieure*, 39(35), 1045-1049.
2. Boutreux, T., Raphaël, E., & De Gennes, P. G. (1997). Propagation of a pressure step in a granular material: The role of wall friction. *Physical Review E*, 55(5) doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.5759>.
3. Gerasymov, O.I. (2016). *Physics of granular materials*. Odessa: TES [in Ukrainian].
4. Gerasymov, O.I., & Spivak, A. Ya. (2020). Some problems of soft matter physics. Odessa: Helvetica Publishing House [in Ukrainian].
5. Fiscina, Jorge E., & Cáceres, Manuel O. (2005). Fermi-like behavior of weakly vibrated granular matter. *Phys. Rev. Lett.* 95, 108003.
6. Gerasymov, O.I., & Spivak, A. Ya. (2019). Parameterization of the local structure of micro-mechanical systems (granular materials). In *The Bogolyubov Kyiv Conference "Problems of theoretical and mathematical physics"*, (p. 73). Kyiv, Ukraine.

7. Samchenko, D. N., Kochetov G. M., & Vasiliev, A. (2020). Energy-saving technology for processing of galvanic sludge with obtaining of radio-absorbing materials. *Environmental Safety and Natural Resources*, 35(3), 30–43. doi: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.30-43>.

*The article was received 11.02.2022 and was accepted after revision 17.05.2022*

**Герасимов Олег Іванович**

доктор фізико-математичних наук, професор, академік АН ВШ України, завідувач кафедри загальної та теоретичної фізики Одеського державного екологічного університету

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

ORCID ID: 0000-0003-2999-9834 **e-mail:** gerasymovoleg@gmail.com

**Сідлецька Людмила Михайлівна**

аспірант кафедри загальної та теоретичної фізики Одеського державного екологічного університету

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

ORCID ID: 0000-0002-1458-011X **e-mail:** milapolonskaa@gmail.com



УДК 532.593.5

**Igor T. Selezov**, DSci, Leading Scientist of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine  
*e-mail*: igor.selezov@gmail.com

**Volodymyr A. Voskoboinick**, DSci, Head of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine  
ORCID ID: 0000-0003-2161-6923 *e-mail*: vlad.vsk@gmail.com

**Oleksandr A. Voskoboinyk**, PhD, Associate professor of the Department of Technical Hydromechanics of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine  
ORCID ID: 0000-0001-8114-4433 *e-mail*: alexandr.vsk@gmail.com

**Anatolii G. Kharchenko**, Senior engineer electrician of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine  
ORCID ID: 0000-0002-5832-7714 *e-mail*: kharchenko62@gmail.com

**Andrey V. Voskoboinick**, PhD, Associate professor of the Department of Hydrobionics and Boundary Layer Control of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine  
ORCID ID: 0000-0001-8045-8625 *e-mail*: andrew.vsk@gmail.com

Institute of Hydromechanics of the National Academy Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## **INTERACTION OF GRAVITATIONAL WAVES WITH PERMEABLE BREAKWATER**

***Abstract.** A method for calculating the parameters of gravitational waves that interact with vertical permeable breakwaters, based on potential theory, has been developed and presented. The wave motion of a fluid was described by the velocity potential that satisfies the Laplace equation. The shape of the wave surface and the components of the velocity vector were determined. Numerical analysis of the influence of permeability of the vertical wall on wave energy adsorption was carried out. The propagation of surface gravitational waves in the linear formulation of problems in a channel with a vertical permeable obstacle was analyzed. The dependence of the wave reflection coefficient as a function of the wave transmission coefficient in accordance with the law of energy conservation was given. Experimental studies have been conducted to determine the features of the hydrodynamic interaction of sea waves and coastal protection structures of the permeable type. The experiments were performed in the laboratory in a wave channel with models of vertical slotted walls of different permeability. Visual and instrumental studies have shown the features of the interaction of the wave field with permeable breakwaters, the formation of reflection and transmission waves through the breakwater. It is established that vertical slotted walls, depending on the permeability, significantly affect the wave field, generate reflected waves and waves passing through the breakwater, as well as lead to a significant dissipation of wave energy. The dependences of the reflection and transmission coefficients of the wave, as well as the dissipation coefficient of the wave energy depending on the permeability of the slotted breakwater and the relative depth of the water area were given. It is shown that with increasing permeability of the breakwater the wave reflection coefficient decreased, and the wave transmission coefficient on the*

*contrary increased. It was found that the reflection coefficient of the wave was increased with increasing relative depth, and the coefficient of wave propagation was decreased. The dissipation coefficient of the wave energy had the maximum value, which was observed for greater permeability of the breakwater, when the relative depth compared to the wavelength was increased.*

**Key words:** *gravitational wave; permeable breakwater; numerical simulation; experimental research; high wave sensors; reflection and transmission waves; wave energy dissipation*

**І.Т. Селезов, В.А. Воскобійник, О.А. Воскобойник,  
А.Г. Харченко, А.В. Воскобійник**

Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

## **ВЗАЄМОДІЯ ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ З ПРОНИКНИМ ХВИЛЕЛОМОМ**

**Анотація.** *Розроблена та викладена методика розрахунку параметрів гравітаційних хвиль, які взаємодіють з вертикальними проникними хвилеломами, на базі потенційної теорії. Хвильовий рух рідини описується потенціалом швидкостей, який задовольняє рівнянню Лапласа. Визначена форма хвильової поверхні та компоненти вектора швидкості. Проведено чисельний аналіз впливу проникності вертикальної стінки на адсорбцію хвильової енергії. Проаналізовано розповсюдження поверхневих гравітаційних хвиль у лінійній постановці задач у каналі з вертикальною проникною перешкодою. Наведено залежність коефіцієнта відбиття хвилі як функцію коефіцієнта проходження хвилі у відповідності до закону збереження енергії. Проведено експериментальні дослідження з визначення особливостей гідродинамічної взаємодії морських хвиль і берегозахисних споруд проникного типу. Експерименти проводилися в лабораторних умовах в хвильовому каналі з моделями вертикальних щільних стінок різної проникливості. Візуальні та інструментальні дослідження показали особливості взаємодії хвильового поля з проникними хвилеломами, формування відбитих та проникних через хвилелом хвиль. Встановлено, що вертикальні щільні стінки залежно від проникності суттєво впливають на хвильове поле, генерують відбиті хвилі та хвилі, що проходять хвилелом, а також призводять до значної дисипації хвильової енергії. Наведені залежності коефіцієнтів відбиття та проходження хвилі, а також коефіцієнта дисипації хвильової енергії залежно від проникності щільного хвилелому та відносної глибини акваторії. Показано, що зі збільшенням проникності хвилелому коефіцієнт відбиття хвилі зменшувався, а коефіцієнт проходження хвилі навпаки збільшувався. Виявлено, що коефіцієнт відбиття хвилі збільшувався зі збільшенням відносної глибини, а коефіцієнт проходження хвилі навпаки зменшувався. Коефіцієнт дисипації хвильової енергії мав максимальне значення, яке спостерігалось для більшої проникності хвилелому, коли відносна глибина в порівнянні з довжиною хвилі збільшувалася.*

**Ключові слова:** *гравітаційна хвиля; проникний хвилелом; чисельне моделювання; експериментальні дослідження; датчики висоти хвиль; відбиті та проникні хвилі; дисипація хвильової енергії*

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.96-111>

## Вступ

Глобальні зміни клімату, потепління, підйом рівня океану зобов'язують людство підвищити вимоги до екологічної безпеки, до охорони навколишнього середовища, зокрема морського узбережжя та суспільно корисної приморської інфраструктури. Захист берегової лінії, об'єктів життєдіяльності, гідротехнічних споруд, морської флори та фауни вимагають неустанної модернізації берегозахисних споруд, що обумовлено кліматичними змінами та збільшенням хвильової енергії моря. Прибережні області відіграють важливу роль в економічному розвитку багатьох країн світу. У цих областях здійснюється будівництво і експлуатація великої кількості житлових, комерційних і промислових будівель, гідротехнічних споруд, причалів, гаваней, які об'єднують внутрішні та зовнішні торгові шляхи країни. Основна проблема розвитку цих територій та прибережних акваторій – це захист від руйнівного впливу хвиль, викликаних штормами і ураганами, повеннями, інтенсивність і періодичність яких зростає в зв'язку з кліматичними змінами. Засоби захисту інфраструктури повинні мати високу ефективність, підвищену екологічну безпеку, надійність та довговічність [1]. Згідно з Морською доктриною України на період до 2035 року [2] про розроблення цільової програми берегоукріплення морського узбережжя, насамперед у районах його інтенсивного використання, існує нагальна потреба у проектуванні та будівництві ефективних з морегосподарської, матеріальної та екологічної точок зору берегозахисних споруд в умовах глобальних змін клімату.

Існує багато типів прибережних захисних споруд. Це дамби, буни, берми, хвилеломи та штучні пляжі, бухти, гавані та інші. Сучасні конструкції берегозахисних споруд також поєднують основні функції захисту берега з можливістю їх використання в рекреаційних, транспортних, біотехнологічних та інших цілях. Вибір типу захисної споруди залежить від місцевих фізичних умов, включаючи кліматичні чинники, характер хвильового навантаження, прибережні течії, перенесення твердої фракції прибережними течіями, ерозію берегів [3, 4].

На межі вода – суша неперервно проходять процеси розмиву, переміщення та акумуляції наносів, які в природних умовах приводять до природного перерозподілу твердої речовини. Інженерна діяльність в береговій зоні змінює береги та напрямок руху наносів, може призводити до руйнування природної рівноваги та деформації берега. Тому дуже актуальним є не тільки розробка та удосконалення методів захисту берегової лінії, але й прогноз довготривалого впливу берегозахисної споруди на стійкість берегової лінії та екологію в районі захисту. Перспективні концепції берегозахисних споруд повинні враховувати кліматичні зміни, пов'язані зі зміною рівня моря, яке у свою чергу впливає на прибережні течії, ерозію берегової смуги. Існуючі берегозахисні споруди в деяких місцях втратили свою захисну властивість тому, що були розраховані та збудовані для інших кліматичних умов.

В останні роки у розвитку берегозахисних споруд намітилася тенденція використання проникних конструкцій, перевага яких полягає в поліпшенні екології захищеної акваторії, економії будівельних матеріалів [1, 5]. У проточній воді не накопичується сміття і забезпечується вільна міграція для морських мешканців. Конструкції проникних берегозахисних споруд відрізняються широким розмаїттям. Це можуть бути близько розташовані

кругові палі, проникні стінки, що складаються з горизонтальних або вертикальних щілин, розташованих на певній глибині. Критерієм їх ефективності є коефіцієнти пропускання, відбиття та дисипації енергії як регулярних, так і одиночних хвиль [4, 5].

Проектування проникних берегозахисних споруд вимагає розрахунку і експериментального дослідження хвильових і ударних гідродинамічних навантажень на елементи цих споруд. Розроблені до теперішнього часу математичні моделі ґрунтуються, як правило, на лінійній теорії хвиль і їх взаємодії з перешкодами [6, 7]. Сюди відносяться методи розкладання за власними функціями, квазілінійні методи, які враховують нелінійні характеристики локальних областей проникної стінки [1, 8]. Так як існуючі математичні моделі використовують суттєві спрощення, важливою складовою є їх експериментальна перевірка [5, 9]. Експериментальні дослідження проводяться в лабораторних і натурних умовах з використанням сучасного високоточного обладнання та засобів обробки і аналізу даних, включаючи статистичні методи теорії ймовірності та математичної статистики [10–12].

**Мета роботи** – вивчення особливостей гідродинамічної взаємодії морських хвиль і берегозахисних споруд проникного типу на основі розробки чисельних моделей та експериментальних досліджень.

### Постановка задачі та методика досліджень

Розглянемо нестисливу в'язку рідину, яка обмежена вільною поверхнею та дном, як показано на рис. 1. Використаємо прямокутну декартову систему координат  $x, y, z$ . Розв'язок задачі знайдемо у перерізі  $y = 0$ , як показано на схемі. Передбачимо, що на рідину діють масові сили гравітаційного поля  $\vec{F} = \rho g \vec{e}_z$ , де  $\rho$  – щільність рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\vec{e}_z$  – одиничний орт.

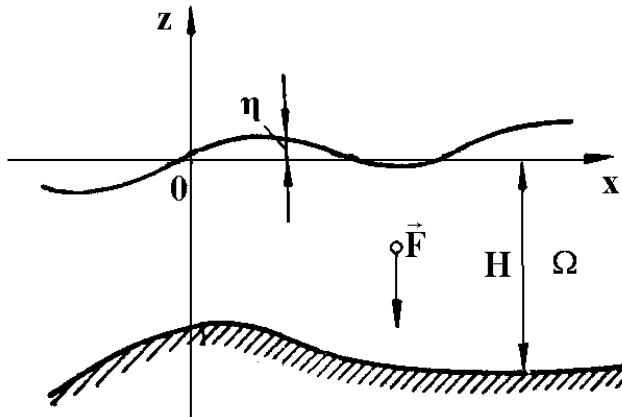


Рис. 1. Геометрія задачі

У незбуреному рівноважному стані вільна поверхня рідини, що покоїться, займає положення  $z = 0$ , а поверхня дна описується рівнянням  $z = -H(x, y)$ . У напрямку координат  $x, y$  рідину може бути безмежною, частково або

повністю обмеженою. Припустимо, що рух рідини безвихровий, а на вільній поверхні не враховуються сили поверхневого натягу. Якщо на поверхні рідини, що спочатку є нерухомою, виникають хвилі, то зі знехтуванням сил в'язкості хвилі можна вважати безвихровими з достатнім ступенем точності. Це впливає з теореми Гельмгольца, а саме, циркуляція вздовж замкненої кривої є постійною в часі.

За зазначеними припущеннями хвильові рухи рідини описуються потенціалом швидкостей, який задовольняє рівнянню Лапласа

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad \vec{v} = \vec{\nabla} \varphi, \quad (1)$$

в області  $\Omega$  маємо  $x^s(y, t) \leq x < \infty, -\infty < y < \infty, -H(x, y) \leq z \leq \eta(x, y, t)$ .

Потенціал швидкостей  $\varphi$  повинен задовольняти наступним граничним умовам на вільній поверхні  $z = \eta(x, y, t)$ :

кінематичній умові

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

динамічній умові

$$g\eta + \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] = F(x, y, t), \quad (3)$$

умові на дні  $z = -H(x, y)$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

початковим умовам

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z, t) \Big|_{t=0} &= f_1(x, y, z), \\ \frac{\partial \varphi(x, y, z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} &= f_2(x, y, z). \end{aligned} \quad (5)$$

Тут  $t$  – час;  $\eta(x, y, t)$  – відхилення вільної поверхні;  $\vec{v}$  – вектор швидкості;  $\vec{\nabla}$  – оператор градієнта  $\vec{\nabla} = \vec{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \vec{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \vec{e}_z \frac{\partial}{\partial z}$ ;  $x^s(y, t)$  – лінія перетину вільної поверхні рідини з берегом;  $F(x, y, t)$ ,  $f_1(x, y, z)$  і  $f_2(x, y, z)$  – задані функції. Функція  $F(x, y, z) = 0$  всюди, крім області  $\Omega$ , де задані поверхневі збурення.

Наведена постановка (1)–(5) відноситься до випадку, коли в момент часу  $t = 0$  виникають збурення на поверхні рідини в області  $D$  і потрібно визначити подальший рух рідини, зокрема, повинні бути визначені форма вільної поверхні  $z = \eta(x, y, t)$  та компоненти вектора швидкості  $\vec{v}$ .

Припустимо тепер, що компоненти вектора швидкості  $\vec{v}$ , відхилення вільної поверхні  $\eta$  та відповідні похідні є малими величинами, квадратами та добутками яких можна знехтувати порівняно з лінійними членами. У цьому випадку рівняння (2) та (3) спрощуються та набувають вигляду

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0; \quad g\eta + \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \quad \text{при } z = 0. \quad (6)$$

Якщо з цих рівнянь виключити  $\eta$ , можна отримати умову

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad \text{при } z = 0. \quad (7)$$

Наведена постановка задачі може бути тільки наближеною відповіддю до реальних хвильових процесів, адже розв'язок конкретних задач у межах моделі (1)–(5) становить великі труднощі.

Розповсюдження хвиль у мілководній частині не розглядається, а застосовуються наближення, які засновано на малості відношення вертикального масштабу глибини  $H = H_{\max}$  до горизонтального масштабу  $l$  (у разі регулярних хвиль це довжина хвилі  $l = \lambda$ ) [13].

Середній потік енергії хвиль на одиницю довжини гребня хвилі, що проходить через фіксовану вертикальну поверхню, паралельну гребню, дорівнює [14]

$$F_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{\eta} \left( \rho \frac{V^2}{2} + p + \rho g z \right) u \, dz \, dt, \quad (8)$$

або з урахуванням рівняння Бернуллі, в якому  $f(t)$  передбачається включеною в похідну  $\partial \varphi / \partial t$ , з (8) отримуємо

$$F_{\text{cp}} = -\rho \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \, dz \, dt. \quad (9)$$

Ця формула придатна для будь-якого безвихрового хвильового руху, лінійного чи нелінійного. У випадку лінійної періодичної прогресивної хвилі маємо

$$\varphi = -\eta \frac{\omega \operatorname{ch} k(d+z)}{k \operatorname{sh} kd} \cos(\omega t - kx). \quad (10)$$

Підставляючи (10) до (9) і нехтуючи деякими членами вищих порядків, отримуємо у разі нескінченно глибокої води

$$F_{cp} |_{d \rightarrow \infty} = \frac{1}{4} \rho g \eta^2 \frac{gT}{2\pi},$$

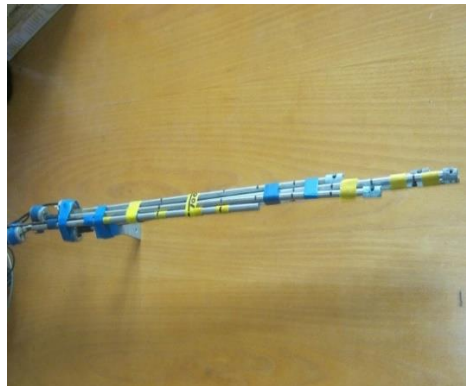
а у випадку мілкої води

$$F_{cp} |_{d \rightarrow 0} = \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \sqrt{gd}.$$

Відповідно до закону збереження енергії, в умовах відсутності дисипації хвильової енергії вертикальною проникною стінкою, енергія набігаючого хвильового поля дорівнює сумі енергії відбитих хвиль і енергії хвиль проходження через проникну стінку. Це характеризується коефіцієнтами відбиття  $k_r$  та проходження  $k_t$  хвилі. Коефіцієнт  $k_r$  представляє собою відношення енергії відбитої хвилі до енергії набігаючої хвилі, а коефіцієнт проходження  $k_t$  являє собою відношення енергії проходження хвилі до енергії набігаючої хвилі. При цьому коефіцієнт проходження хвилі характеризує опір абсорбуючого матеріалу. Із закону збереження енергії випливає, що  $\sqrt{k_r^2 + k_t^2} = 1$  за відповідного нормування.



а



б

Рис. 2. Експериментальний стенд (а) та п'єзорезистивні датчики висоти хвиль (б)

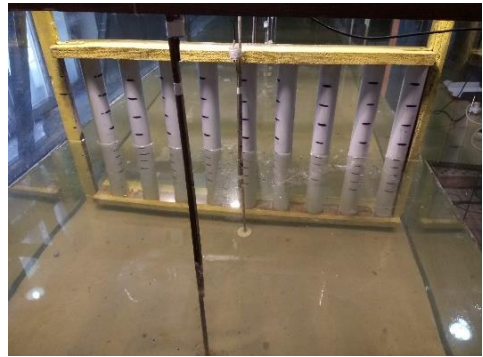
### Програма та методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводилися у хвильовому каналі довжиною близько 50 м, шириною та глибиною 1 м. Рівень води в каналі змінювався від 0,5 м до 0,7 м. Канал був обладнаний щитовим генератором хвиль та щільним похилим поглиначем хвиль (в кінці каналу). Усередині каналу на відстані близько 40 м від генератора хвиль встановлювалися на плоску піщану основу товщиною 0,2 м проникні хвилеломні у вигляді вертикальних щільних стінок (рис. 2а). Таким чином, рівень води в місці розташування досліджуваних проникних хвилеломів змінювався від 0,3 м до 0,5 м. Бічні стінки каналу були виготовлені зі скла для проведення візуальних досліджень.

Експериментальний стенд був обладнаний контрольно-вимірювальною апаратурою, системою обробки та аналізу експериментальних даних. Вздовж поздовжньої осі каналу перед і позаду щільної стінки розташовувалися п'єзорезистивні датчики висоти хвилі. В експериментах одночасно використовувалися до 8 датчиків висоти хвилі, серед яких застосовувалися традиційні ємнісні датчики, а також спеціально розроблені та виготовлені п'єзорезистивні датчики (рис. 2б) [15, 16]. Це високочутливі диференціальні вібро- та термокомпенсовані датчики тиску. У цих датчиках чутливі елементи за допомогою технології мікроелектронної техніки наносилися на тонку кварцову мембрану, що під впливом тиску згиналася, а п'єзорезистивні елементи змінювали свій опір. Посилені електричні сигнали подавалися на багатоканальні аналогово-цифрові перетворювачі. Ці датчики встановлювалися в тонкостінних трубках (рис. 2б), нижні кінці яких поміщалися у воду. Під дією хвильового руху стовп води в трубках змінювався і викликав осциляції тиску всередині трубок, які реєструвалися п'єзорезистивними датчиками. В експериментах застосовувалися датчики, які мали роздільну здатність до 0,2 Па або 0,02 мм водяного стовпа. Ці датчики реєстрували як статичний, так і динамічний тиск. Калібрування та тарування п'єзорезистивних датчиків висоти хвилі проводилося як абсолютними, так і відносними методами.



а



б

Рис. 3. Однорядні циліндричні моделі хвилеломів проникністю 20% (а) та 50% (б) всередині хвильового каналу

Експерименти проводилися з однорядними щільними стінками різної проникності, які розташовувалися всередині хвильового каналу паралельно до фронту регулярних хвиль (рис. 3). Стінки були виготовлені із вертикальних циліндрів діаметром 0,05 м, між якими залишалися щілини. Проникність таких стінок (відношення площі щілин до площі стінки) змінювалася від 0% (суцільна вертикальна стінка) до 60%.

Візуалізація хвильового руху та особливостей формування струменевої та вихрової течії між циліндрами щільної стінки та в околі самої стінки проводилася за допомогою кольорових барвників та чорнил. Чорнила вводилися в потік за допомогою мініатюрних трубок. Траєкторії руху струмінців чорнил реєструвалися цифровими фотоапаратами та відеокамерами. Відео- та фотоматеріал подавався на спеціально створену комп'ютерну графічну станцію, де за спеціальними програмами оброблявся та аналізувався [17–19].



## Результати дослідження

Результати візуальних досліджень дали можливість оцінити особливості хвильового руху, його взаємодії з проникними хвилеломами та оцінити просторово-часові характеристики зворотно-поступального руху рідини між циліндрами щілинної стінки. Дослідження показали, що залежно від режимів хвильового руху, конструкції та проникності хвилеломів перед щілинними стінками формується інтенсивний хвильовий рух, а за стінками висоти хвиль значно менші, ніж перед ними. При цьому на хвильовій поверхні в різні часові інтервали спостерігалися набігаючі, відбиті, стоячі хвилі та хвилі, що проходили через щілинні стінки. Хвилі, які взаємодіяли з проникною стінкою, генерували хвильові тиски на обтічній поверхні хвилелому і знакозмінні навантаження на вертикальну стінку.

Відомо, що ефективність хвилеломів або вертикальних стінок, що експлуатуються як берегозахисні споруди, визначається особливостями формування відбитих хвиль та хвиль, що проходять крізь хвилелом, а також здатністю поглинання або дисипації енергії хвиль хвилеломом. Ефективність таких споруд визначається коефіцієнтами відбиття хвиль ( $k_r$ ), проходження хвиль ( $k_t$ ) та дисипації хвильової енергії ( $k_e$ ). Визначення цих коефіцієнтів у дослідженнях проводилося за допомогою виміру висот хвиль перед проникним хвилеломом і за ним.

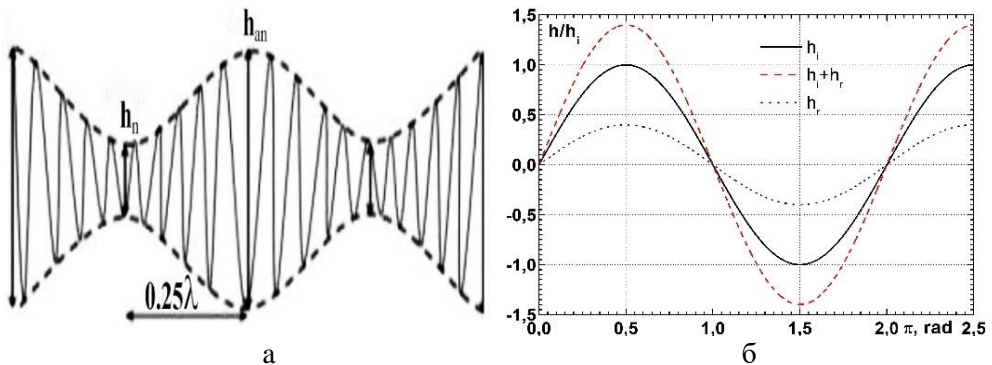


Рис. 4. Схеми визначення висот хвиль двоточковим методом (а) та одноточковим методом (б)

Висота відбитої хвилі визначалася двома способами. Перший метод – це визначення висоти відбитої хвилі за допомогою двох датчиків висоти хвилі, один з яких знаходився на відстані довжини хвилі ( $\lambda$ ) від хвилелому, а інший – на відстані  $1,25\lambda$  від хвилелому. Перший датчик вимірював висоту хвилі ( $h_{an}$ ) в пучності стоячої хвилі, яка формувалася в результаті інтерференції набігаючої хвилі та відбитої хвилі. Другий датчик вимірював висоту хвилі ( $h_n$ ) у вузлі стоячої хвилі (рис. 4а).

Висота набігаючої хвилі визначалася як

$$h_i = \frac{h_{an} + h_n}{2}, \quad (11)$$

а висота відбитої хвилі визначалася як

$$h_r = \frac{h_{an} - h_n}{2}. \quad (12)$$

Звідси коефіцієнт відбиття хвилі визначався як

$$k_r = \frac{h_r}{h_i} = \frac{h_{an} - h_n}{h_{an} + h_n}. \quad (13)$$

Разом з двоточковим методом застосовувався метод визначення висоти відбитої хвилі з вимірюванням висоти стоячої хвилі датчиком висоти хвилі, який розташовувався по осі хвильового каналу перед хвилеломом на віддаленні більше однієї довжини набігаючої хвилі. При цьому висота набігаючої хвилі була виміряна в тестових дослідженнях роботи генератора хвиль в умовах відсутності хвилелому всередині хвильового каналу та абсорбції хвиль. Висота відбитої хвилі визначалася за допомогою віднімання висоти набігаючої хвилі з висоти стоячої хвилі, як схематично показано на рис. 4б. Таке представлення можливе, коли стояча хвиля є суперпозицією набігаючої і відбитої хвилі, які мають однаковий період і швидкість переносу (швидкості протилежно спрямовані). В результаті швидкість переміщення стоячої хвилі в поздовжньому напрямку дорівнює нулю і стояча хвиля робить тільки вертикальні коливання. Для даного методу визначення висоти відбитої хвилі коефіцієнт відбиття хвилі визначався як

$$k_r = \frac{h_r}{h_i}. \quad (14)$$

На значення коефіцієнтів відбиття та проходження хвилі, а також на співвідношення між ними величезний вплив мають фізичні процеси, що відбуваються під час взаємодії хвиль з проникними берегозахисними спорудами. Коли хвилелом встановлюється у морському середовищі, то відбуваються суттєві зміни хвильового поля. Спостерігається інтерференція, дифракція та трансформація хвиль, з'являються відбиті, стоячі та проникні хвилі, виникає обвалення хвиль [20, 21]. Орбітальні швидкості хвильового руху зазнають змін, збільшується турбулентність, перед хвилеломом і опорними палями генеруються підковоподібні і слідні вихори, а також струменеві течії між палями, що призводить до збільшення тертя між поверхнею хвилелому і рідиною, що рухається, а також розсіювання або дисипації енергії хвилі.

Закон збереження енергії вихідної гравітаційної хвилі, що взаємодіє з проникним хвилеломом, виражається так:

$$E_i = E_r + E_t + E_d, \quad (15)$$

де  $E_i$  – енергія набігаючої хвилі ( $E_i = \rho g h_i^2 / 8$ );  $E_r$  – енергія відбитої хвилі ( $E_r = \rho g h_r^2 / 8$ );  $E_t$  – енергія проникної хвилелом хвилі ( $E_t = \rho g h_t^2 / 8$ );  $E_d$  – енергія дисипації хвилі. Підставляючи в рівняння (15) значення  $E_r$ ,  $E_t$  і  $E_d$ , а також розділивши складові цього рівняння на  $E_i$ , отримуємо:

$$1 = (h_r / h_i)^2 + (h_t / h_i)^2 + E_d / E_i \quad (16)$$

або

$$k_e = 1 - (k_r^2 + k_t^2). \quad (17)$$

Коефіцієнти відбиття і проникнення хвиль, а також коефіцієнти дисипації хвильової енергії залежно від проникності щілинних стінок та відносної глибини представлені на рис. 5. Результати вимірювання цих коефіцієнтів наведено для різних глибин, які нормовані довжиною хвилі ( $H / \lambda$ ). Крива 1 виміряна для відносної глибини  $H / \lambda = 0,03$ ; крива 2 виміряна для  $H / \lambda = 0,06$ ; крива 3 –  $H / \lambda = 0,11$ ; крива 4 –  $H / \lambda = 0,16$ ; крива 5 –  $H / \lambda = 0,22$ ; крива 6 –  $H / \lambda = 0,30$  і крива 7 –  $H / \lambda = 0,42$ . Результати дослідження, які наведено на рис. 5а, показують, що зі збільшенням проникності щілинної стінки коефіцієнти відбиття хвилі монотонно зменшуються. При цьому темп зменшення коефіцієнтів вищий для стінок малої проникності. Суцільний хвилелом повністю відбиває набігаючу хвилю і коефіцієнт відбиття хвилі для такого хвилелому  $k_r = 1$ . Зі збільшенням безрозмірної глибини ( $H / \lambda$ ) коефіцієнти відбиття хвилі збільшуються, як показано на рис. 5а.

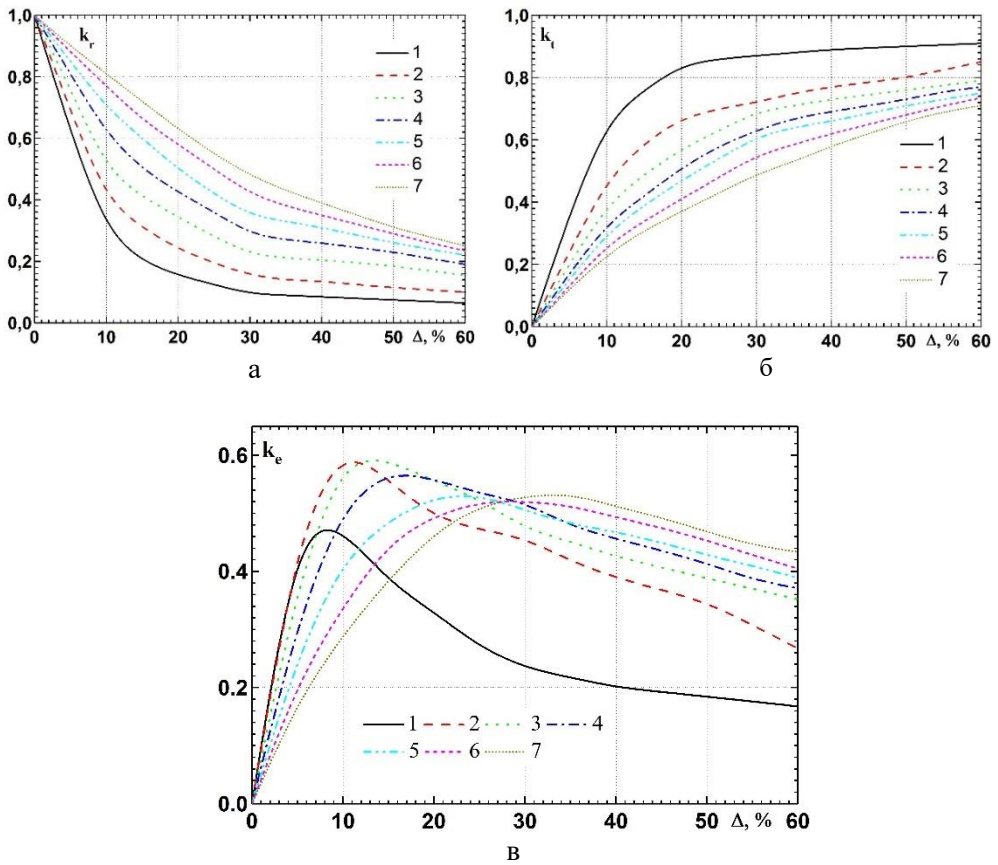


Рис. 5. Коефіцієнти відбиття (а) і проникнення (б) хвиль та дисипації хвильової енергії (в) в залежності від проникності хвилелому

Як показали результати дослідження проникної хвилі позаду щільного хвилелому, характер зміни коефіцієнта проникної хвилі  $k_t$  має протилежну тенденцію відносно зміни коефіцієнта відбиття хвилі (див., рис. 5а та рис. 5б). Зі збільшенням проникності та зменшенням глибини або збільшенням довжини хвилі коефіцієнт проходження хвилі збільшується.

Як показали результати дослідження (рис. 5в), максимальна дисипація хвильової енергії спостерігалася при більшій проникності хвилелому тоді, коли відносна глибина збільшувалася або коли довжина хвилі ставала меншою.

Таким чином, вимірювання особливостей хвильового поля та вихрового тиску поблизу проникного хвилелому показали, що проникний хвилелом зменшує висоту хвилі у захищеній хвилеломом акваторії залежно від параметрів хвиль та конструкції хвилелому. Висота хвилі перед хвилеломом вища, ніж за хвилеломом, що підтверджує ефективність роботи такого проникного хвилелому.

## Висновки

Проведено чисельний аналіз впливу проникності вертикальної стінки на адсорбцію хвильової енергії. Проаналізовано розповсюдження поверхневих гравітаційних хвиль у лінійній постановці задач у каналі з вертикальною проникною перешкодою. Наведено залежність коефіцієнта відбиття хвилі як функцію коефіцієнта проходження хвилі у відповідності до закону збереження енергії.

Встановлено, що вертикальні щільні стінки залежно від проникності суттєво впливають на хвильове поле, генерують відбиті хвилі та хвилі, що проходять хвилелом, а також призводять до значної дисипації хвильової енергії. Представлені залежності коефіцієнтів відбиття та проходження хвилі, а також коефіцієнта дисипації хвильової енергії залежно від проникності щільного хвилелому та відносної глибини акваторії.

Показано, що зі збільшенням проникності хвилелому коефіцієнт відбиття хвилі зменшувався, а коефіцієнт проходження хвилі навпаки збільшувався. Виявлено, що коефіцієнт відбиття хвилі збільшувався зі збільшенням відносної глибини, а коефіцієнт проходження хвилі навпаки зменшувався. Коефіцієнт дисипації хвильової енергії мав максимальне значення, яке спостерігалася для більшої проникності, коли відносна глибина в порівнянні з довжиною хвилі збільшувалася.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sundar, V., Sannasiraj, S.A., Sriram, V., & Nowbuth, M.D. (Eds.) (2021). *Proceedings of the Fifth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2019), Lecture Notes in Civil Engineering 106*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8506-7>
2. Морська доктрина України на період до 2035. (2020). *Постанова Кабінету Міністрів України від 18 грудня 2018 р. № 1108 (Із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 1023 від 28.10.2020)*.
3. Eaton, M.J., Johnson, F.A., Mikels-Carrasco, J., et al. (2021). *Cape Romain Partnership for Coastal Protection*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1021. <https://doi.org/10.3133/ofr20211021>

4. Voskoboinick, V., Khomitsky, V., Voskoboinyk, O., Tereshchenko, L., & Voskoboinick, A. (2021). Wave loads on protective dam of the Marine channel of the Danube-Black sea. *Hydro-environment Research*, 35(3), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.003>
5. Alkhalidi, M., Alanjari, N., & Neelamani, S. (2020). Wave interaction with single and twin vertical and sloped slotted walls. *J. Mar. Sci. Eng.*, 8, 589-1-23. <https://doi.org/10.3390/jmse8080589>
6. Selezov, I.T., Kryvonos, Yu.G., & Gandzha, I.S. (Eds.) (2018). *Wave propagation and diffraction. Mathematical methods and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4923-1>
7. Khimich, A.N., Selezov, I.T., & Sydoruk, V.A. (2020). Simulation of elastic wave diffraction by a sphere in semibounded region. *Reports (Dohovidi) of NAS of Ukraine*, 10, 22-27. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.10.022>
8. Poguluri, S.K., & Cho, I.H. (2021). Wave dissipation over a horizontal slotted plate with a leeside vertical seawall: analytical and numerical approaches. *Coastal Engineering J.*, 63(1), 52-67. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1850396>
9. Chooanizade, M.J., Bakhtiari, M., & Rostami, M. (2020). Wave transmission through the perforated half-depth block-made wall breakwater: An experimental study. *Ocean Engineering*, 215, 107895-1-9. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107895>
10. Bendat, Ju.S., & Piersol, A.G. (2010). *Random Data: Analysis and Measurement Procedure*, Wiley.
11. Vinogradnyi, G.P., Voskoboinick, V.A., Grinchenko, V.T., & Makarenkov, A.P. (1989). Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder. *J. Fluid Dyn.*, 24(5), 695-700. <https://doi.org/10.1007/BF01051721>
12. Voskoboinick, V.A., Voskoboinick, A.A., Turick, V.N., & Voskoboinick, A.V. (2020). Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93(5), 1205-1220. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>
13. Whitham, G.B. (1999). *Linear and nonlinear waves*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118032954>
14. Le Mehaute, B. (1976). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-85567-2>
15. Voskoboinick, V., Kornev, N., & Turnow, J. (2013). Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. *Flow Turbulence Combust.*, 90(4), 709-722. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9433-9>
16. Voskoboinick, V.A., Voskoboinick, A.V., Areshkovych, O.O., & Voskoboinyk, O.A. (2016). Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. *Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016*. (pp. 905-910). Oxford, UK. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
17. Voskobijnyk, A.V., Voskoboinick, V.A., Voskoboinyk, O.A., Tereshchenko, L.M., & Khizha, I.A. (2016). Feature of the vortex and the jet flows around and inside the three-row pile group. *Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016*. (pp. 897-903). Oxford, UK. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-114>
18. Voskoboinick, A., Voskoboinick, V., Turick, V., Voskoboinyk, O., Cherny, D., & Tereshchenko, L. (2021). Interaction of group of bridge piers on scour. In Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He (Eds.), *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1247*. (pp. 3-17). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_1)
19. Voskoboinick, V.A., Gorban, I.M., Voskoboinick, A.A., Tereshchenko, L.N., & Voskoboinick, A.V. (2021). Junction flow around cylinder group on flat plate. In V.A. Sadovnichiy, M.Z. Zgurovsky (Eds.), *Contemporary Approaches and Methods in Fundamental Mathematics and Mechanics. Understanding Complex Systems*. (pp. 35-50). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4_3)

20. Koraim, A.S. (2014). Hydraulic characteristics of pile-supported L-shaped bars used as a screen breakwater. *Ocean Engineering*, 83, 36-51. <https://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.03.016>
21. Reddy, M.S., & Neelamani, S. (1992). Wave transmission and reflection characteristics of a partially immersed rigid vertical barrier. *Ocean Engineering*, 19(3), 313-325. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(92\)90032-Y](https://doi.org/10.1016/0029-8018(92)90032-Y)

Стаття надійшла до редакції 17.02.2022 і прийнята до друку після рецензування 26.05.2022

## REFERENCES

1. Sundar, V., Sannasiraj, S.A., Sriram, V., & Nowbuth, M.D. (Eds.) (2021). *Proceedings of the Fifth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2019), Lecture Notes in Civil Engineering 106*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8506-7>
2. Mors'ka doktryna Ukraine na period do 2035. (2020). *Postanova Kabinety Ministriv Ukraine vid 18 grudnya 2018 r. № 1108 (Iz zminamy, vnesenyму zgidno z Postanovoyu KM № 1023 vid 28.10.2020)* [In Ukrainian].
3. Eaton, M.J., Johnson, F.A., Mikels-Carrasco, J., et al. (2021). *Cape Romain Partnership for Coastal Protection*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1021. doi: <https://doi.org/10.3133/ofr20211021>
4. Voskoboinick, V., Khomitsky, V., Voskoboinyk, O., Tereshchenko, L., & Voskoboinick, A. (2021). Wave loads on protective dam of the Marine channel of the Danube-Black sea. *Hydro-environment Research*, 35(3), 1-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.003>
5. Alkhalidi, M., Alanjari, N., & Neelamani, S. (2020). Wave interaction with single and twin vertical and sloped slotted walls. *J. Mar. Sci. Eng.*, 8, 589-1-23. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse8080589>
6. Selezov, I.T., Kryvonos, Yu.G., & Gandzha, I.S. (Eds.) (2018). *Wave propagation and diffraction. Mathematical methods and applications*. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4923-1>
7. Khimich, A.N., Selezov, I.T., & Sydoruk, V.A. (2020). Simulation of elastic wave diffraction by a sphere in semibounded region. *Reports (Dohovidi) of NAS of Ukraine*, 10, 22-27. doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.10.022>
8. Poguluri, S.K., & Cho, I.H. (2021). Wave dissipation over a horizontal slotted plate with a leeside vertical seawall: analytical and numerical approaches. *Coastal Engineering J.*, 63(1), 52-67. doi: <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1850396>
9. Chooanizade, M.J., Bakhtiari, M., & Rostami, M. (2020). Wave transmission through the perforated half-depth block-made wall breakwater: An experimental study. *Ocean Engineering*, 215, 107895-1-9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107895>
10. Bendat, Ju.S., & Piersol, A.G. (2010). *Random Data: Analysis and Measurement Procedure*, Wiley.
11. Vinogradnyi, G.P., Voskoboinick, V.A., Grinchenko, V.T., & Makarenkov, A.P. (1989). Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder. *J. Fluid Dyn.*, 24(5), 695-700. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01051721>
12. Voskoboinick, V.A., Voskoboinick, A.A., Turick, V.N., & Voskoboinick, A.V. (2020). Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93(5), 1205-1220. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>
13. Whitham, G.B. (1999). *Linear and nonlinear waves*. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118032954>
14. Le Mehaute, B. (1976). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer-Verlag. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-85567-2>

15. Voskoboinick, V., Kornev, N., & Turnow, J. (2013). Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. *Flow Turbulence Combust.*, 90(4), 709-722. doi: <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9433-9>
16. Voskoboinick, V.A., Voskoboinick, A.V., Areshkovych, O.O., & Voskoboinyk, O.A. (2016). Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. In *Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016*. (pp. 905-910). Oxford, UK. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
17. Voskobijnyk, A.V., Voskoboinick, V.A., Voskoboinyk, O.A., Tereshchenko, L.M., & Khizha, I.A. (2016). Feature of the vortex and the jet flows around and inside the three-row pile group. In *Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016*. (pp. 897-903). Oxford, UK. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315375045-114>
18. Voskoboinick, A., Voskoboinick, V., Turick, V., Voskoboinyk, O., Cherny, D., & Tereshchenko, L. (2021). Interaction of group of bridge piers on scour. In Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He (Eds.), *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1247*. (pp. 3-17). Springer. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_1)
19. Voskoboinick, V.A., Gorban, I.M., Voskoboinick, A.A., Tereshchenko, L.N., & Voskoboinick, A.V. (2021). Junction flow around cylinder group on flat plate. In V.A. Sadovnichiy, M.Z. Zgurovsky (Eds.), *Contemporary Approaches and Methods in Fundamental Mathematics and Mechanics. Understanding Complex Systems*. (pp. 35-50). Springer. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4_3)
20. Koraim, A.S. (2014). Hydraulic characteristics of pile-supported L-shaped bars used as a screen breakwater. *Ocean Engineering*, 83, 36-51. doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.03.016>
21. Reddy, M.S., & Neelamani, S. (1992). Wave transmission and reflection characteristics of a partially immersed rigid vertical barrier. *Ocean Engineering*, 19(3), 313-325. doi: [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(92\)90032-Y](https://doi.org/10.1016/0029-8018(92)90032-Y)

*The article was received 17.02.2022 and was accepted after revision 26.05.2022*

#### **Селезов Ігор Тимофійович**

доктор фізико-математичних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

**Адреса робоча:** 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

**e-mail:** igor.selezov@gmail.com

#### **Воскобійник Володимир Анатолійович**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

**Адреса робоча:** 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

ORCID ID: 0000-0003-2161-6923 **e-mail:** vlad.vsk@gmail.com

#### **Воскобойник Олександр Анатолійович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу технічної гідромеханіки Інституту гідромеханіки НАН України

**Адреса робоча:** 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

ORCID ID: 0000-0001-8114-4433 **e-mail:** alexandr.vsk@gmail.com

#### **Харченко Анатолій Григорович**

головний інженер-електрик відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

**Адреса робоча:** 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

ORCID ID: 0000-0002-5832-7714 **e-mail:** kharchenko62@gmail.com

**Воскобійник Андрій Володимирович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу гідробіоніки та керування примезовим шаром Інституту гідромеханіки НАН України

**Адреса робоча:** 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

**ORCID ID:** 0000-0001-8045-8625 **e-mail:** andrew.vsk@gmail.com



UDC 551.4 + 477.86

**Oleh M. Adamenko**, D. S., Professor of Ecology Institute of Natural Sciences and Tourism, Department of Ecology, IFNTUOG  
ORCID ID: 0000-0003-0821-3011 *e-mail*: katernya.radlovska@nung.edu.ua

**Denys O. Zorin**, PhD, Associate Professor of Ecology Institute of Natural Sciences and Tourism, Department of Ecology, IFNTUOG  
ORCID ID: 0000-0002-3519-8171 *e-mail*: denzor@gmail.com

**Katernya O. Radlovska**, PhD, Associate Professor of Ecology Institute of Natural Sciences and Tourism, Department of Ecology, IFNTUOG  
ORCID ID: 0000-0003-2640-4735 *e-mail*: katernya.radlovska@nung.edu.ua

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

## FORECASTING OF DISASTER FLOODS IN DNIESTER VALLEY

*Summary.* In recent years, two catastrophic floods have occurred in the Carpathian region and in Podillya: one on July 23–28, 2008, and the other on June 20–24, 2020. Both caused enormous damage to the environment and the population, which was widely reported in the media. To be prepared for natural disasters, you need to learn to predict them, that is, to know in what area they occur, what will be the height of the rise of water and when it will happen. From this triad, the first two components have already learned to predict, but the third has not yet. The article considers the possibility of a weather forecast, which was confirmed during the flood of June 20–24, 2020. O.M. Adamenko and D.O. Zorin plotted global climate change over the period of the Earth's history from its birth 4.567 billion years ago to the present. It turned out that the warm and cold periods alternated periodically, from the Galactic Year (225–250 million years), of which there were 19, to the current 11 summer cycles of solar activity. A total of 13 orders of cycles were identified, which interfere in the form of sinusoids, determining the periodicity of geological events. Geotectonic epochs of the 2nd order (50–70 million years) are superimposed on the cyclicity of the 1st order – galactic years – these are Karelian, Baikal, Caledonian, Hercynian, Pacific and Alpine tectonic-magmatic epochs, which are divided into parts of the 3rd (30–40 million years) and 4th (10–15 million) orders. The following cycles – 5 (3–5 million years), 6 (150–140 thousand years) and 7 (10–20 thousand years) are associated with a large Cenozoic cooling, which ended with the Quaternary glaciation. 8 (1–4 thousand years) and 9 (500–600 years) cycles reflect changes in warming and cooling in the quarter. And then the analysis of events is reconstructed on the basis of archaeological and chronicle data: from the beginning of our era to the XII century. Warming of the IX cycle continued – a small climatic optimum and a small ice age (XIII – XVII centuries). Since the XIX century modern warming began with clear 33-year fluctuations of the X cycle. Since 1881, instrumental observations have appeared at meteorological stations and hydro posts. XI (20–15–11 years), XII (5–6 years) and XIII (3–4 years) cycles appeared. Against the background of 33 annual fluctuations in the global climate, 11 annual cycles and catastrophic floods of 1911, 1927, 1941, 1955, 1969, 1980, 1988, 2002, 2008 appeared, and the catastrophic flood of 2020 predicted by O.M. Adamenko and D.O. Zorin. Thus, it is possible to learn to predict the time of the next catastrophic flood.

**Keywords:** floods; river valley; cycles; periods; landfill

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.112-120>

## Introduction

**Problem statement in general and connection with important scientific and practical tasks.** For many centuries, the population and environment of the Carpathian region and Podillya have suffered from catastrophic floods. Only the penultimate floodplain on July 23–28, 2008 flooded the valley of the Dniester, Prut and their tributaries to a height of 10 m, covering 70% of the territory of Ivano-Frankivsk, Lviv, Chernivtsi, Zakarpathian, Ternopil and Vinnytsia regions. According to the State Committee for Water Management of Ukraine [1], only in Ivano-Frankivsk region 417 settlements, 24 905 houses, 20 600 hectares of agricultural lands were affected, 602,6 km of shores were washed away, 25,445 km of fortifications were destroyed, 10,645 km of protective dams were damaged, 66 were damaged and 4 were destroyed. 9 km of roads, 347 bridges, 24 water intakes were destroyed, 19 people died, including 5 children. Losses caused more than UAH 4,2 billion [2].

The catastrophic flood of 2020 occurred in several stages in different areas. Initially, on June 20–24, Ivano-Frankivsk, Lviv and Ternopil regions were flooded. Later, on June 29 – early July, the flood repeated in the Lviv region and "went" to Volyn. July 4–5 – again some regions of Ivano-Frankivsk and Ternopil regions, and July 7–9 – Volyn, Vinnytsia and Odesa.

**Selection of previously unsolved parts of the overall problem.** Previously studied the state of forests, flora and fauna, and other components of the environment, such as pedosphere, hydrosphere, air, were ignored, which negatively affected the strategic environmental assessment of nature reserves, ignoring the procedures of environmental audit and monitoring, reducing the level environmental safety of these important areas [1, 7, 11].

Thus, the aim of this article is a more complete coverage of all components of the environment and the development of a methodology for ecological assessment of soil and vegetation, water resources, air, and the impact of the technosphere on them.

The study was performed by the Department of Ecology of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas under the leadership of O.M. Adamenko, with the participation of M.I. Mosyuk, D.O. Zorin, K.O. Radlovska, N.O. Zorina and master's students – future ecologists. Field environmental studies on the monitoring network at 78 observation points [1] were performed from 2012 to 2019, and their analytical and computer processing – in 2015–2019 [1, 11, 16].

**From the history of research.** Since the northeastern border of the Dniester RLP is the Dniester River, its valley, especially the canyon, researchers have long been attracted. The first cartographic document was the General Map of Podillya at a scale of 1: 800,000, which was presented in 1650 by the French military cartographer W. Boplan under the Polish King Wladyslaw IV [17]. Since 1772, after the transition of Galicia to Austria-Hungary, the future territory of the Dniester RLP was several times "covered" by topographic surveys at scales of 1:28 800, 1:75 000 and 1:25 000. The maps are still stored in the Vienna Military Archives. In 1794–1805, the Slovak cartographer Jan Lipski made a map of Hungary, including Galicia [12].

The first published works belong to Polish geologists V. St. Staszic (1815), whose name is now the Krakow Academy of Mining and Metallurgy, J. Push (I. Push, 1830), E. Eichwald (E. Eichwald, 1846), N.P. Barbot-de-Marne (1867) [3, 15, 16]. Among the geological information of these authors there is a lot of data on the state of soils, waters and vegetation.

Systematic study of the nature of the former Galicia began with the removal of the scale of 1:75 000, which resulted in the publication in 1887–1907 "Geological Atlas of Galicia" [2, 17]. After the First World War, Polish researchers W. Zych (1930) and R. Kozłowski (1929) divided the sediments in the Dniester Valley into tiers and horizons by studying fossil fauna and flora. The study of Transnistria was conducted by the Romanian geologist G. Vascaucanu (1931) and the Russian specialists R.R. Virzhikovskiy (1929, 1932) and G.F. Lungershausen (1941) [13]. Yu. Polyansky made a significant contribution to the study of terraces, fossil soils, forests and archeological monuments. His "Podolsk Etudes" has not lost its scientific significance until now [15]. After the annexation of Galicia to the USSR in 1939, work began on generalizing the previously collected material, which was reflected in the book "Geology and Minerals of the Western Regions of the USSR" (1941) edited by N.A. Behovera. After the Second World War, beginning in 1947, in the Western region of Ukraine began large-scale geological surveys, exploration and exploration with large volumes of seismic, magnetometric, electrical and other geophysical works, accompanied by large volumes of drilling with depths from hundreds to thousands of meters. This made it possible to study in detail the Quaternary sediments and geomorphology [5–8].

In 1959–1960, G.P. Shramenko, G.M. Padalko and P.G. Lazarenko performed a comprehensive geological survey at a scale of 1: 200,000 sheets of M-35-XXVI Volyn-Podolsk series, which directly relates to our research area [5–8, 10].

A large amount of natural material was collected by the expedition of the Lion Society, which worked on the Dniester in the 90s of the twentieth century. Its task was to develop a system of land, water and forest use on a landscape basis in the transition to a market economy. The research involved German colleagues (G. Plachter and others) from the Universities of Marburg, Dortmund, Frankfurt, and from the Ukrainian side – Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas, Institute of Ecology of the Carpathians, Lviv National University Ivan Franko, Institute of Environmental Monitoring, etc. (O.M. Adamenko, I.P. Kovalchuk, V.M. Stetsyuk, V.G. Omelchenko, O.M. Zhuravel, D.O. Zorin, etc.) [1, 10, 11, 14, 16].

In recent years, expeditions of the Lviv National University named after Ivan Franko (A.B. Bogutsky, A.M. Yatsyshyn), Maria Curie-Skłodowska University of Lublin, Poland (M. Lanchont), I. Krepyakevych Institute of Ukrainian Studies NASU (O.S. Sytnyk), Geological Institute of the Polish Academy of Sciences (T. Madeyska) [4, 5–12].

The ecological state of the geological environment, geomorphosphere, water resources, atmospheric air, soil and vegetation of the Dniester canyon was studied in the candidate's dissertation of D.O. Zorin, whose materials are partially published in his textbook [11] and ecological-tourist essay "Dniester Canyon". The works of D.O. Zorin we will use in the future, with component-by-component characterization of the natural environment of the Dniester Regional Landscape Park.

## **The main material**

The first part of the triad is the territorial forecast. DILI has an area of 1460 km<sup>2</sup> – which is divided into 72 squares with an area of 20 km<sup>2</sup> on a scale of 1: 10000. The study involved 52 students of future masters, who assessed the ecological situation in each square, took soil samples and others. Thus, the landfill was mapped at a

scale of 1: 10000 and maps of Quaternary sediments, geomorphological and landscape. Their joint analysis allowed to distinguish hypsometric levels of low (+ above the water edge in the Dniester and its tributaries), medium (+ 3 m), high (+5 m) floodplain and floodplain (+ 10–12 m) terraces [7, 10]. On this basis the Map of ecological risk of flooding of territories by catastrophic floods is constructed. This allows not only to perform spatial forecasting, i.e. which areas will be covered with water, but also to determine for each settlement, which will be flooded and which will remain "dry", from which it will not be necessary to evacuate the population.

According to geological (stratigraphic, paleontological, lithological, tectonic, radioisotope, and other studies of James Lehr, Douglas Palmer, Clare Peterson, Charles Walcott and Louis Alvarez, developed by the Smithsonian Institution in Washington, DC, New York Museum of History, the Institute of Human Paleontology in Paris [1], in the geological history of the Earth there are several elements of different orders (epochs, periods, cycles) of development [13–17] the path together with the solar system and the Earth around its (galaxy) center. There were 19 such revolutions since the birth of the Earth (4.567 billion years ago).

The cycle is an alternation of tectono-magmatic stages with a length of 50–70 million p., when geosynclinal depressions were transformed into mountain-folded systems, "soldered" by magmatic bodies. There were several such cycles not yet established in the Gadean, Archean, and Proterozoic eons – Karelian, Baltic, Caledonian, Hercynian, Pacific, and Alpine. Phanerozoic tectonic-magmatic stages are divided into III (30–40 million years) and IV (10–15 million years) orders – substages.

IV cycles are complicated by ecological catastrophes – collisions of the Earth with other space bodies (Wertford meteorite in the Proterozoic, Chixulub asteroid at the end of the Pacific tectono-magmatic stage – 65 million p. with a diameter of 300 km near Antarctica and the Permian extinction of biota), etc.

The closer to the present, the more detailed are the periodic cycles of historical and geological events. So, for example, according to archeological and paleontological researches of M.F. Veklych from the Kiev Institute of Geography of NASU, for the period from emergence of our ancestor *Homo habilis* 2,3 million p. therefore, 16 paleoclimatic changes took place in Kiev Rus (V – 3–1 million p., VI – 130–140 thousand p., VII – 10–20 thousand p.). At the end of each, there were extreme situations with climate change [5, 12] from warm and humid conditions to dry, cold and even glaciation. These are the Aidar, Kryzhaniv, Berezan, Azov, Martan, Sul, Lubny, Tiligul, Zavadov, Dnieper, Kaidak, Tyasmin, Pryluky, Uday, Buz, and Black Sea stages [6]. They were accompanied by extreme catastrophic phenomena.

Climatic optimum from the beginning of the new era until the XII century, when it was replaced by a small ice age (IX cycle) (XIII – XVIII centuries), followed by warming of the XIX – early XX centuries (X cycle). Interesting is the graph of climate change over the last millennium, when against the background of global climate fluctuations appeared 33 summer cycles of 1911, 1921, 1941, 1955, 1969, 1980, 1998, 2002, 2008 and 2020. This is the XI order of cycles with a frequency of 19–15–11 years, which is divided into XII (5–6 years) and XIII (3–4 years) cycles.

The resulting curve of climatic fluctuations throughout the history of the Earth is the superposition of sinusoids of the following order, which make it possible to compare the frequency of catastrophic floods after a certain number of years. Thus,



**Discussion of the obtained results.** The causes of catastrophic floods are natural and anthropogenic (man-made).

The natural ones are:

- western Atlantic cyclones, moving to the east, after crossing the Carpathians as an orographic barrier, "swirl" and fall with heavy rains (up to 3 monthly norms in one day), i.e. excessive rainfall;
- deeply dissected steep terrain promotes rapid descent of rainwater from the interfluvies and slopes to the tributaries, and then to the main river, the level of which rises by several meters in a very short period of time;
- high moisture saturation of the soil substrate from previous rains, which reduces the water absorption capacity;
- seismic instability of individual blocks of the lithosphere;
- weak engineering-geological and physical-mechanical properties of bedrock – forests, loess-like loams and sandstones, micritic argillites and siltstones, which spill quickly, form subsidence, which leads to siltation of tributaries, as well as landslides, mudslides, etc.;
- reduction of the protective capacity of forest vegetation, especially tall trees due to early cessation of vegetation, tree disease, drying of grass leaves in meadows;
- high water power, which causes high flow rates of water and others.

Anthropogenic (technogenic) factors include:

- mismanaged (illiterate) activities;
- planned and poaching deforestation of the Carpathian forests, the emergence of more and more "bald spots", and the forest cover could reduce the intensity of water elements by up to 30%;
- unsystematic plowing of watersheds without anti-erosion measures;
- construction of river floodplains, especially water protection zones and water protection strips;
- unauthorized extraction of sand-gravel-pebble mixtures from riverbeds, which intensifies bottom erosion and "entails" the intensification of force processes – landslides, mudslides, screes, landslides, etc.;
- construction of highways along riverbeds, and they need to be moved to higher levels;
- construction and restoration of bridges destroyed by floods without sufficient deepening of supports (piles) to the bedrock;
- destruction of Polonyn meadows, Polonyn forests and long periods of cattle grazing in the same areas, etc.

## Conclusions

To overcome the consequences of the catastrophic floods of 2008 and 2020 and their possible prevention, it is necessary:

1. To instruct the Dniester Basin Department of Water Resources (here in after DBUVR) to develop a "State Program for Protection against Catastrophic Floods and Floods in the Western Region of Ukraine" (here in after SE) with the involvement of SES in Ivano-Frankivsk region, Department of Ecology and Natural Resources of Ivano-Frankivsk Regional State Administration, National Space Agency of Ukraine (NSAU), Space Information Reception Center in Dunaevtsi, Khmelnytsky Region, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (IFNTUNG), Kyiv National University T.G. Shevchenko, Lviv National

University I. Franko, NTU of Water Management and Nature Management of Rivne, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU in Kyiv, Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation of NAAS and other organizations.

2. To support the initiative of IFNTUNG, which at its own expense created the Center for Forecasting and Prevention of Technogenic and Hydroecological Danger of Prykarpattia (CPPTGNP), approve its Regulations, Strategy for 2021–2023, Business Plan for 2021 and resolve issues of financing CPPG.

3. IFNTUNG to perform Strategic Environmental Assessment (SEA) of economic development in the prepared areas and 2–3 standard, Environmental Impact Assessment (EIA) of individual enterprises in Halych, Tlumach and Horodenka regions.

4. CPPTGNP to continue the development of AVIPS – an automated information and measurement flood control system taking into account similar systems on the Prut River in Chernivtsi, the Tisza River in Transcarpathia and the Danube River in Vienna (Austria).

When developing a SOE, take into account the solution of the following problems:

1. To substantiate the network of observations for constant monitoring of the environment and ecological audit of flooded areas.

2. CPPTGNP perform retrospective analysis of historical-geological, space, geomorphological, paleogeographic, archaeological, chronicle and instrumental methods to create a system of periodicity of extreme processes, in order to predict and prevent catastrophic floods.

3. To propose solutions to alternatives for the protection of the left bank of the Dniester in the Halych district: construction of a protective dam along the left bank of the Dniester from the village of Stary Martyniv to the village of Dubivtsi; construction of a bypass road from Halych through the village of Tustan and Bolshivtsi to the town of Burshtyn; organization of a spare polder between the dam and the road for loading flood water; increasing the height of the road and railway from Halych to Burshtyn.

4. To consider the issue of additional discharge of flood water of the Dniester by building a canal on the left bank between the villages of Nyzhniv and Dibrova.

5. Design the transfer of roads to non-flooding.

## REFERENCES

1. Adamenko, O.M., Zorin, D.O. (2018). Stan dovkillia u richkovykh dolynakh z katastrofichnymy pavodkamy. Pershyi etap ekolohichnykh doslidzhen na Dnistrovskomu protypavodkovomu polihoni (2012-2018 pp.): monohrafiia. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH.
2. Adamenko, O.M., Zorin, D.O., Mosiuk, M.I., Radlovska, K.O. (2020). Ekoloho-ekonomichni naslidky katastrofichnykh pavodkiv ta yikh podolannia na Dnistrovskomu inzhenerno-ekolohichnomu polihoni. *Ekolohichni forum*, 1, 54-64.
3. Herasimov, L.S., Makarova, I.V., Chalyi, S.V. et al. (2005). Derzhavna heolohichna karta Ukrainy. Masshtab 1:200 000. Arkush M-34-XXIV (Drohobych). Kyiv: UkrDNHRI.
4. Vashchenko, O.V., Turchynov, S.M., Polikha, H.H. (2007). Derzhavna heolohichna karta Ukrainy. Masshtab. 1:200 000. Arkush M-35-XXV (Ivano-Frankivsk). Kyiv: UkrDNHRI.
5. Ekolohichna entsyklopediia v 3-kh tomakh. (2008). Kyiv: Tsentr ekolohichnoi osvity ta informatsii.

6. Zorin, D.O. (2016). Heohrafichni informatsiini systemy ekolohichnoi bezpeky. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P.
7. Kravchuk, Ya.S. (1999). Heomorfolohiia Peredkarpattia. Lviv: Merkator.
8. Liubinska, L.H. (2001). Natsionalnyi pryrodnyi park «Podilski Tovtry». In *Zapovidnyky I natsionalni pryrodni parky Ukrainy*. Kyiv.
9. Movchan, Ya.I. (1997). Ekolohichna merezha Ukrainy. Obhruntuvanniay yii struktury ta neobkhidnosti stvorennia. In *Kontsepsiia pro biotychne riznomanittia: Hromadska obiznanist ta uchast*. Kyiv.
10. Palienco, V.P. (1974). O typakh holotsenovoho aliuvyia dolyny Dnestra. Mat po chetvertychnomu peryodu Ukrainy (pp. 247-250). Kyiv: Naukova dumka.
11. Pasetskyi, V.M., Borysenkov, E.P. (1988). Tysjacheletnjaja letopis' neobychajnyh javlenij prirody. Moskva: Mysl.
12. Pryrodno-zapovidnyi fond Ukrainy: terytorii ta obiekty zahalnodержavnogo znachennia. (2009). Kyiv: Tsentr ekolohichnoi osvity ta informatsii.
13. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., Trysniuk, V.M. (2020). Heoinformatsiini tekhnolohii zakhystu dovkillia pryrodno-zapovidnogo fondu. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P.
14. Adamenko, O.M., Holbert, A.V., Osniuk, V.A., Matvyshyna, Zh.M., Motok, V.E., Syrenko, N.A. et al. (1996). Chetvertychnaia paleoheohrafyia jekosistemy Nyzhneho y Sredneho Dnestra. Kyev: Fenyks.
15. Boguckyj, A., Lancont, T.M., Raciacowski, R. (2000). Condition and course of the Middle and Upper Pleistocene loesses in the Halic profile (NW Ukraine). *Studia Quaternaria*, 17, 3-17. Warszawa.
16. Lomanicki, A. (1905). Atlas Geologicny Galicyi. Krakow.
17. Madeyska, T. (ed.). (2002). Lessy I paleolit Naddnisterza halickego (Ukraina). *Studia Geológica Polonica*, 119, 5-391. Krakow.
18. Romer, E. (1906). Epocha lodowana Swidowell. *Kosmos*, XXXI: 363-386.
19. Teisseyre, H. (1933). Spaczenieteraswschonio-polskiego Podkarpacia w stosunku do kuminacyj fliszuobwo dowego. *Geologia I Statystyka Naftowa*, 8, 80-81.

*The article was received 14.11.2021 and was accepted after revision 20.04.2022*

### **О.М. Адаменко, Д.О. Зорін, К.О. Радловська ПРОГНОЗУВАННЯ КАТАСТРОФІЧНИХ ПОВЕНЕЙ В ДОЛИНІ ДНІСТРА**

За останні роки в Карпатському регіоні та на Поділлі відбулися дві катастрофічні повені: одна – 23–28 липня 2008 р. та друга – 20–24 червня 2020 р. Обидві завдали величезної шкоди довкіллю та населенню, що було широко висвітлено в ЗМІ. Щоб бути готовим до стихійних лих, потрібно навчитися їх передбачати, тобто знати, в якій місцевості вони трапляються, якою буде висота підйому води і коли це станеться. З цієї триади перші два компоненти вже навчилися передбачати, а третій – ще ні. У статті розглядається можливість прогнозування, яке підтвердилося під час повені 20–24 червня 2020 р. О.М. Адаменко та Д.О. Зорін окреслили глобальні зміни клімату за період історії Землі від її народження 4,567 мільярда років тому до сьогодення. Виявилося, що теплий і холодний періоди періодично чергувалися, від Галактичного року (225–250 млн років), яких було 19, до нинішніх 11-річних циклів сонячної активності. Всього було виділено 13 порядків циклів, які інтерферують у вигляді синусоїд, що визначають періодичність геологічних подій. Геотектонічні епохи 2-го порядку (50–70 млн років) накладаються на циклічність 1-го порядку – галактичних років – це Карельська, Байкальська, Каледонська, Герцинська, Тихоокеанська та Альпійська тектоніко-магматичні епохи, які поділяються на частини 3-го (30–40 млн років) і 4-го (10–15 млн) порядків. Наступні цикли – 5-й (3–5 млн років), 6-й (150–140 тис. років) і 7-й (10–20 тис. років) пов'язані з великим кайнозойським похолоданням, яке завершилося четвертинним зледенінням. 8-й (1–4 тис. років) і 9-й (500–600 років) цикли відображають зміни потепління і похолодання в кварталі. А далі



аналіз подій реконструюється на основі археологічних та літописних даних: від початку нашої ери до XII ст. Тривало потепління IX циклу – малий кліматичний оптимум і малий льодовиковий період (XIII – XVII ст.). З XIX ст. сучасне потепління почалося з чітких 33-річних коливань X циклу. З 1881 з'явилися інструментальні спостереження на метеостанціях і гідропостах. З'явилися XI (20–15–11 років), XII (5–6 років) і XIII (3–4 роки) цикли. На тлі 33-річних коливань глобального клімату виникли 11-річні цикли і катастрофічні повені 1911, 1927, 1941, 1955, 1969, 1980, 1988, 2002, 2008 рр., як і катастрофічна повінь 2020 р., передбачена О.М. Адаменком та Д.О. Зоріним. Отже, є можливим передбачати час наступної катастрофічної повені.

*Стаття надійшла до редакції 14.11.2021 і прийнята до друку після рецензування 20.04.2022*

**Адаменко Олег Максимович**

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

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

ORCID ID: 0000-0003-0821-3011 **e-mail:** kateryna.radlovska@nung.edu.ua

**Зорін Денис Олексійович**

кандидат геологічних наук, доцент кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

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

ORCID ID: 0000-0002-3519-8171 **e-mail:** denzor@gmail.com

**Радловська Катерина Олексіївна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2640-4735> **e-mail:** kateryna.radlovska@nung.edu.ua

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copying © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. All rights reserved.

## ДО УВАГИ АВТОРІВ ЗБІРНИКА

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню збірника.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова (не менше п'яти) двома мовами (українською та англійською).

Підготовка статті здійснюється в текстовому редакторі MS WORD for WINDOWS, з використанням шрифту Times New Roman, Суг, кегль 11, одинарний інтервал, полями 2,0 см з кожного боку, заданим розміром сторінок 17x26 см.

Усі формули мають бути набрані в редакторі MathType.

Ілюстрації повинні обов'язково нумеруватися, мати книжкову орієнтацію і не можуть перевищувати за розміром задану сторінку (параметри сторінки 17x26 см з полями 2,0 см). Перелік літературних джерел перекладається англійською мовою (або транслітерується в романському алфавіті) і подається відповідно до міжнародного стандарту оформлення наукових публікацій **APA (American Psychological Association) style** загальним списком у кінці статті за чергою посилань у тексті.

Наприкінці статті наводиться коротка довідка про авторів, де вказуються прізвище, повне ім'я та по батькові авторів, науковий ступінь, вчене звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, особисті дані кожного з авторів (адреса, місто, країна, контактний телефон, e-mail), ORCID ID.

Обов'язково слід надати електронну версію статті в редакторі Microsoft Word.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами збірника, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ збірника, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником. Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія збірника.

Електронна версія збірника, правила оформлення та вимоги до статей містяться в Інтернеті на сайті <http://www.es-journal.in.ua>, який систематично оновлюється.

Збірник наукових праць також представлений на сайті Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України <http://itgip.org/> у розділі «Видавнича діяльність» та на сайті бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури <http://library.knuba.edu.ua/node/883>.

*Редактор – В.П. Берчун*

---

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»  
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36а.  
Тел.: (044) 360-22-66  
[www.yuston.com.ua](http://www.yuston.com.ua)

**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру  
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції  
серія дк № 497 від 09.09.2015 р.**

---

Підписано і здано до друку 28.06.2022. Формат 70x108/16. Папір офсетний.  
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 10.68  
Обл.-вид. арк. 7.6  
Замовлення № \_\_\_\_\_

Тираж 300 примірників

---

КИЇВ 2022