

# МЕТЕОРОЛОГІЯ • ГІДРОЛОГІЯ • МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ

№ 1 (9) • 2026

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

### **В. І. Осадчий**

головний редактор, д. географ. н., професор, академік НАН України,  
Український гідрометеорологічний інститут (УкрГМІ) ДСНС України та НАН України

### **Ю. Б. Набиванець**

заступник головного редактора, к-т географ. н., УкрГМІ ДСНС України та НАН України

### **О. Л. Шевченко**

відповідальний редактор, д. геол. н., УкрГМІ ДСНС України та НАН України

## Члени редколегії

### **Л. О. Горбачова**

д-р геогр. наук, професор,  
УкрГМІ ДСНС України та НАН України

### **В. В. Гребінь**

д-р геогр. наук, професор,  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка

### **С. В. Краковська**

канд. фіз.-мат. наук,  
УкрГМІ ДСНС України та НАН України

### **П. М. Линник**

д-р хім. наук, професор,  
Інститут гідробіології НАН України

### **В. Ф. Мартазінова**

д-р фіз.-мат. наук, професор,  
УкрГМІ ДСНС України та НАН України

### **В. А. Овчарук**

д-р геогр. наук, професор,  
Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова

### **Н. М. Осадча**

д-р геогр. наук, професор,  
УкрГМІ ДСНС України та НАН України

### **М. В. Савенець**

канд. геогр. наук,  
УкрГМІ ДСНС України та НАН України

### **В. М. Самойленко**

д-р геогр. наук, професор,  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка

### **О. Я. Скриник**

канд. фіз.-мат. наук,  
УкрГМІ ДСНС України та НАН України

### **С. І. Сніжко**

д-р геогр. наук, професор,  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка

### **Ю. С. Тучковенко**

д-р геогр. наук, професор,  
Інститут морської біології  
Національної академії наук України,

### **В. К. Хільчевський**

д-р геогр. наук, професор,  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка

### **В. М. Хохлов**

д-р геогр. наук, професор,  
Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова,  
Університет Стерлінгу,  
Об'єднане Королівство

### **В. М. Шпиг**

канд. геогр. наук,  
УкрГМІ ДСНС України та НАН України

### **Т. В. Соловей**

д-р геогр. наук, професор,  
Польський геологічний Інститут —  
Національний дослідний інститут,  
Варшава, Польща

### **Т. Петайя**

PhD, професор,  
Інститут досліджень атмосфери  
та Землі (IHAR),  
Факультет природничих наук  
Гельсінського університету, Фінляндія

### **О. Янковський**

PhD, професор, Школа Землі, Океану  
та навколишнього середовища,  
Університет Південної Кароліни,  
Колумбія, США

### **І. Іалонго**

PhD, Центр космічних і наземних спостережень,  
Фінський метеорологічний інститут,  
Хельсінки, Фінляндія

# METEOROLOGY • HYDROLOGY • ENVIRONMENTAL MONITORING

№ 1 (9) • 2026

## EDITORIAL BOARD

### **Volodymyr Osadchyi**

*Editor in Chief, D.Sci. in Geography, professor, academician of the NAS of Ukraine, Ukrainian Hydrometeorological Institute (UHMI) of the State Emergency of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine*

### **Iurii Nabyvanets**

*Deputy editor in Chief, PhD in Geography sci., Ukrainian Hydrometeorological Institute*

### **Oleksii Shevchenko**

*Deputy editor in Chief, D.Sci. in Geology, Ukrainian Hydrometeorological Institute*

## Members of editorial board

### **Liudmyla Gorbachova**

*D.Sci. in Geography, professor, Ukrainian Hydrometeorological Institute*

### **Vasyl Grebin'**

*D.Sci. in Geography, professor, Taras Shevchenko Kyiv National University*

### **Svitlana Krakovska**

*PhD in Phys.-Math. Sci., Ukrainian Hydrometeorological Institute*

### **Peter Linnik**

*D.Sci. in Chemistry, professor, Institute of Hydrobiology of the National Academy of Sciences of Ukraine*

### **Vazira Martazinova**

*D.Sci. in Phys.-Math. Sci., professor, Ukrainian Hydrometeorological Institute*

### **Valeriya Ovcharuk**

*D.Sci. in Geography, professor, Odesa I. I. Mechnikov National University*

### **Natalia Osadcha**

*D.Sci. in Geography, professor, Ukrainian Hydrometeorological Institute*

### **Mykhailo Savenets**

*PhD in Geography Sci., Ukrainian Hydrometeorological Institute*

### **Viktor Samoilenko**

*D.Sci. in Geography, professor, Taras Shevchenko Kyiv National University*

### **Oleg Skrynyk**

*PhD, in Phys.-Math. Sci., Ukrainian Hydrometeorological Institute*

### **Sergiy Snizhko**

*D.Sci. in Geography, professor, Taras Shevchenko Kyiv National University*

### **Yurii Tuchkovenko**

*D.Sci. in Geography, professor, Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine*

### **Valentyn Khilchevskyi**

*D.Sci. in Geography, professor, Taras Shevchenko Kyiv National University*

### **Valeriy Khokhlov**

*D.Sci. in Geography, professor, Odesa I. I. Mechnikov National University, University of Stirling, United Kingdom*

### **Vitalii Shpyg**

*PhD in Geography Sci., Ukrainian Hydrometeorological Institute*

### **Tetyana Solovey**

*D.Sci. in Geography, professor, Polish Geological Institute — National Research Institute (PGI-NRI)*

### **Tuukka Petäjä**

*PhD, professor, Institute for Atmospheric and Earth System Research (INAR) / Physics, Faculty of Science, University of Helsinki, Finland*

### **Alexander Yankovsky**

*Ph.D, professor, School of the Earth, Ocean and Environment, University of South Carolina, Columbia, USA*

### **Iolanda Ialongo**

*PhD, Space and Earth Observation Centre, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland*

|  |     |  |     |
|--|-----|--|-----|
| <b>ФІЗИКА І ХІМІЯ АТМОСФЕРИ</b>  |     | <b>PHYSICS AND CHEMISTRY OF ATMOSPHERE</b>   |     |
| <b>Заболотна О.С., Кривошеїн О.О., Кривобок О.А.,</b>  | 5   | <b>Zabolotna O., Kryvoshein O., Kryvobok O.,</b>   | 5   |
| Аналіз просторово-часового розподілу кількості блискавок в Україні за 2017–2021 рр.  |     | Analysis of the spatio-temporal distribution of lightning strikes in Ukraine for 2017–2021   |     |
| <b>Уманець А.П., Савенець М.В.</b>   | 16  | <b>Umanets A., Savenets M.</b>   | 16  |
| Вертикальний розподіл озону верхньої тропосфери — нижньої стратосфери над територією України за даними реаналізу EAC4  |     | Ozone vertical distribution in the upper troposphere — lower stratosphere over Ukraine based on the EAC4 reanalysis data   |     |
| <b>КЛІМАТОЛОГІЯ</b>  |     | <b>CLIMATOLOGY</b>   |     |
| <b>Нажмудінова О.М.</b>  | 26  | <b>Nazhmudinova O.</b>   | 26  |
| Сучасні умови зволоження на півночі України  |     | Modern conditions of humidification in the north of Ukraine  |     |
| <b>ГІДРОХІМІЯ, РАДІОЕКОЛОГІЯ</b>   |     | <b>HYDROCHEMISTRY, RADIOECOLOGY</b>  |     |
| <b>Линник П.М., Жежеря В.А.</b>  | 35  | <b>Petro Linnik P., Zhezherya V.</b>   | 35  |
| Вуглеводи як важлива складова природних органічних речовин у поверхневих водах   |     | Carbohydrates as an important component of natural organic substances in surface waters  |     |
| <b>Рудаков Д.В., Чехун О.В., Битько Ю.М.</b>   | 50  | <b>Rudakov D., Chahun O., Yurii Bytko</b>  | 50  |
| Оцінювання параметрів водно-солевого режиму р. Інгулець в зоні техногенезу за даними гідрохімічного моніторингу  |     | Evaluation of water-salt regime parameters for the Inhulets river in the technogenic affected zone based on hydrochemical monitoring data  |     |
| <b>ЧИСЛОВІ МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ В ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЇ</b>  |     | <b>NUMERICAL METHODS AND MODELS IN HYDROMETEOROLOGY</b>  |     |
| <b>Христюк Б.Ф., Горбачова Л.О.</b>  | 62  | <b>Khrystiuk B., Gorbachova L.</b>   | 62  |
| Декомпозиція, моделювання та прогнозування часового ряду витрат води річки десни засобами пакету “BSTS” мови програмування R   |     | Decomposition, modeling and forecasting of the time series of discharge of the desna river using the “BSTS” package of the R programming language                                    |     |
| <b>МОНІТОРИНГ І ПРОБЛЕМИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ</b>  |     | <b>MONITORING AND PROBLEMS OF ENVIRONMENTAL POLLUTION</b>  |     |
| <b>Кіреєв С.І., Нікітіна Т.І., Самойлов Д.А., Бунтова О.Г., Федоренко О.А., Пилипчук Т.В., Лясківський В.В., Горovenko В.Д.</b>  | 71  | <b>Kirieleiev S., Nikitina T. Samoilov D., Buntova O., Fedorenko P., Pylypchuk T., Liaskivskyi V., Horovenko V.</b>  | 71  |
| Радіаційний стан зони відчуження у 2025 році за результатами радіаційно-екологічного моніторингу   |     | Radiation state of the exclusion zone of 2025 in accordance with the results of radiation environmental monitoring   |     |
| <b>Азімов О.Т., Голубов С.І., Лубський М.С., Орленко Т.А.</b>  | 87  | <b>Azimov O., Golubov S., Lubskyi M., Tetiana Orlenko</b>  | 87  |
| Результати польових обстежень ділянок для валідації моніторингової оцінки деградації земель королівства марокко за різномірними даними. Стаття 1. Рівнинна посушлива територія |     | Results of field surveys of plots for validation of monitoring assessment of land degradation in the kingdom of morocco based on heterogeneous data. Article 1. Plain arid territory |     |
| <b>МЕТОДИ І ЗАСОБИ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ</b>   |     | <b>METHODS AND MEANS OF HYDROMETEOROLOGICAL OBSERVATIONS</b>   |     |
| <b>Пігулевський П.Г., Яремій С.О.</b>  | 106 | <b>Pihulevskyi P., Yaremii S.</b>  | 106 |
| До питання вивчення механізму розвантаження надлишкових поверхневих вод за допомогою геофізичних спостережень  |     | On the study of the mechanism of excess surface water discharge using geophysical observations   |     |
| <b>ГІДРОЛОГІЯ СУХОДОЛУ</b>   |     | <b>HYDROLOGY</b>   |     |
| <b>Кошкіна О.В., Василенко Є.В., Гребін В.В., Маслова Т.В.</b>   | 114 | <b>Koshkina O., Vasylenko Ye., Grebin V., Maslova T.</b>   | 114 |
| Побудова інтерполяційної поверхні середнього річного стоку води в межах районів річкових басейнів України з використанням ГІС-інструментарію                                   |     | Mapping of average annual river runoff within the river basin districts of Ukraine using GIS tools   |     |
| <b>ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ</b>   | 124 | <b>RULES FOR AUTHORS</b>   | 124 |



## МЕТЕОРОЛОГІЯ • ГІДРОЛОГІЯ • МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ

Київ. 2026. № 1 (9). 124 с.

### Засновник та видавець

УКРАЇНСЬКИЙ  
ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ДСНС УКРАЇНИ ТА НАН УКРАЇНИ

Журнал засновано  
25 листопада 2021 року.  
Виходить 2 рази на рік.

Внесено до переліку фахових видань  
України (категорія "Б") за спеціальністю  
Е4 (103) Науки про Землю  
згідно наказу МОН України  
№ 1721 від 10.12.24.

### Рекомендовано до друку

Вченою Радою Українського  
гідрометеорологічного інституту  
ДСНС України та НАН України  
(№ 2-П/95 від 07.05.2026 р.)

Рішенням Національної ради України  
з питань телебачення і радіомовлення  
№ 478 від 29.02.2024 р. присвоєно  
ідентифікатор медіа R30–02943

Видання представлене  
у розділі наукової періодики  
на сайті Національної бібліотеки  
ім. В.І. Вернадського

### Адреса редакції:

Україна, проспект Науки, 37, Київ, 03028  
e-mail: [journal@uhmi.org.ua](mailto:journal@uhmi.org.ua)  
тел. +38 044 525 1250

### Відповідальний редактор:

Олексій Шевченко

### Дизайн обкладинки:

Катерина Сурай

### Editorial office address

37, Prospect Nauky, Kyiv, 03028, Ukraine  
e-mail: [journal@uhmi.org.ua](mailto:journal@uhmi.org.ua)  
phone: +38 044 525 1250

### Responsible editor:

Oleksii Shevchenko

### Cover design:

Kateryna Surai

Підписано до друку 07.05.2026 р. Формат 60×84/8. Друк офсетний. Папір крейдований.  
Ум. друк. арк. 15,81. Наклад 100 прим. Зам. № УГІ-01-26.

Оригінал-макет та друк ТОВ "ДІА": 03022, Київ-22, вул. Васильківська, 45.

Цілковите або часткове розмноження в будь-який спосіб матеріалів,  
опублікованих у цьому виданні, допускається лише з письмового дозволу видавця.

© Український гідрометеорологічний інститут, 2026

**О.С. Заболотна**

ORCID: 0009-0009-6338-7672  
zabolotnaolena@ukr.net

**О.О. Кривошеїн**

ORCID: 0000-0001-5029-4228  
krivoshein@uhmi.org.ua

**О.А. Кривобок**

ORCID: 0000-0002-1730-1809  
kryvobok@uhmi.org.ua

Український  
гідрометеорологічний  
інститут  
Державної служби України  
з надзвичайних ситуацій  
та Національної академії  
наук України, Київ

УДК 551.594.12:551.515.9(477)

DOI:

## АНАЛІЗ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОГО РОЗПОДІЛУ КІЛЬКОСТІ БЛИСКАВОК В УКРАЇНІ ЗА 2017–2021 рр.

У статті показано результати розрахунку та аналізу просторово-часового розподілу кількості блискавок "хмара–земля" в Україні за період з травня по вересень 2017–2021 років на основі даних системи грозопеленгації Українського гідрометеорологічного інституту. Проаналізовано загальну кількість ударів блискавок у землю та їх щільність (кількість блискавок на  $1 \text{ км}^2$  —  $\text{бл/км}^2$ ) у межах кожної області. Середнє значення щільності по Україні за п'ятирічний період становило  $0,89 \text{ бл/км}^2$ , а середня річна кількість блискавок — близько 539 тис. Найвищі показники щільності в середньому за 5 років спостерігалися в Одеській області ( $1,34 \text{ бл/км}^2$ ), Запорізькій ( $1,15 \text{ бл/км}^2$ ), Миколаївській ( $1,14 \text{ бл/км}^2$ ), Івано-Франківській ( $1,08 \text{ бл/км}^2$ ), Вінницькій ( $1,05 \text{ бл/км}^2$ ) та Закарпатській ( $1,05 \text{ бл/км}^2$ ). Найнижчі значення зафіксовано у Сумській області ( $0,54 \text{ бл/км}^2$ ), Харківській ( $0,59 \text{ бл/км}^2$ ), Чернігівській ( $0,63 \text{ бл/км}^2$ ) та Волинській ( $0,65 \text{ бл/км}^2$ ). Найбільшу кількість блискавок загалом на території України зареєстровано у 2018 році (658 тис.), найменшу — у 2020 році (322 тис.). Додатково встановлено, що сезонний максимум грозової активності припадає на червень–липень, коли утворюються найінтенсивніші конвективні системи. Регіональні відмінності за інтенсивністю розрядів "хмара–земля" пов'язані з поєднанням термодинамічних та орографічних чинників. Аналіз міжрічних змін показав істотну залежність кількості блискавок від типу атмосферної циркуляції та умов формування атмосферної конвекції. Отримані результати поглиблюють розуміння сучасних особливостей грозової активності в Україні та можуть бути використані для оцінювання територій щодо ризику ураження блискавкою, удосконалення систем раннього попередження та планування заходів безпеки. Також вони можуть слугувати базою для подальших досліджень у сфері кліматичного моніторингу та аналізу екстремальних атмосферних явищ.

**Ключові слова:** блискавка, грозова активність, щільність ударів, просторово-часовий розподіл, грозопеленгація.

### ВСТУП

Грозові процеси є одним із найважливіших індикаторів конвективної активності атмосфери та сучасних кліматичних змін у помірних широтах. Кількість та інтенсивність блискавок безпосередньо відображають енергетичний стан нижньої тропосфери, вертикальну стійкість повітряних мас і рівень вологості, а також визначають потенційну небезпеку для природних і техногенних систем. Тому аналіз просторово-часового розподілу блискавок має важливе як наукове, так і прикладне значення — для оцінки грозової небезпеки, прогнозування екстремальних явищ і виявлення тенденцій кліматичних змін (Величко, 2014; Мацук, 2013; Chernokulsky et al., 2023).

В останні десятиліття в Європі спостерігається помітне зростання частоти конвективних явищ, зокрема сильних гроз, які включають шквали, град,

блискавки. Це пов'язано з підвищенням температури повітря, зростанням вологості та енергії нестійкості CAPE (Convective Available Potential Energy), що підсилює розвиток атмосферної конвекції (Feldmann et al., 2025; Pilorz et al., 2024). Моделювання показує, що за умов потепління на  $3^\circ\text{C}$  кількість штормів у Європі може зрости на 10–15%, причому зона їхньої найбільшої активності поступово зміщується на північний схід, охоплюючи територію України (Feldmann et al., 2025).

Для території України характерна значна регіональна варіабельність грозової активності, зумовлена як циркуляційними, так і орографічними чинниками. За багаторічними спостереженнями (Величко, 2014; Холопцев & Мацук, 2012), найбільша кількість грозових днів припадає на західні та південні області, тоді як північний схід залишається найменш активним регіоном. Такий розподіл пояснюється

поєднанням численних факторів, які включають високу сонячну радіацію, потоки теплого морського повітря, орографічне підняття та переважання меридіональних типів атмосферної циркуляції, що створюють умови для розвитку потужної термічної конвекції (Величко, 2014; Недострелова & Чумаченко, 2021).

Регіональні дослідження підтверджують, що в останні роки грозова активність в Україні має тенденцію до підвищення у південних і західних областях. Так, було показано (Федонюк та ін., 2021) зростання кількості днів із грозою на Волині та в Україні порівняно з кліматичною нормою. Було відзначено (Мацук, 2013) поширення зон максимумів грозової активності з Карпат на всю південно-західну частину країни, тоді як в іншому дослідженні (Величко, 2014) було показано зв'язок цього зі збільшенням частоти меридіональних процесів і підсиленням циклогенезу.

Подібні закономірності простежуються і в сусідніх країнах Центрально-Східної Європи. Зокрема аналіз понад 8 млн ударів блискавок у Польщі за 2002–2019 рр. (Poręba, Taszarek, & Ustrnul, 2022) показав, що грози мають чітко виражену сезонну та добову циклічність — їхня найбільша частота припадає на літні місяці, а добовий максимум спостерігається у післяполуденні години (14:00–16:00). Найвища щільність блискавок зареєстрована у південній та південно-східній частині країни, де поєднуються підвищені значення конвективної енергії (CAPE до 1000 Дж/кг) та помірний вертикальний порив вітру (8–15 м/с). Ці умови забезпечують розвиток потужної глибокої конвекції, подібної до тієї, що спостерігається у південних і центральних регіонах України. Попередні роботи для території України базувалися переважно на даних метеорологічних станцій і відображали кількість днів із грозою, що не дає кількісної оцінки інтенсивності явища блискавок. Сучасні системи грозопеленгації, які фіксують точні координати ударів блискавок, дають можливість здійснити кількісний аналіз просторово-часових закономірностей грозової активності з високою точністю.

Високе значення кількості блискавок на певній території, свідчить про значний ризик інших небезпечних явищ, моніторинг та прогнозування яких є необхідним для вживання заходів безпеки для населення та інфраструктури. Так, було показано, що підвищена грозова активність корелює з частішими випадками екстремальних опадів і градових бур (Agaayar et al., 2024; Кривобок О. та ін., 2018).

Таким чином, **актуальність даного дослідження** зумовлена: необхідністю кількісної оцінки інтенсивності блискавок в Україні на основі сучасних да-

них системи грозопеленгації; потребою виявлення просторових і часових закономірностей у розподілі блискавок за умов кліматичних змін; відсутністю систематичних публікацій, що відображають регіональні особливості інтенсивності блискавок в Україні за останні роки. Вивчення просторово-часового розподілу блискавок в Україні, зокрема в розрізі областей, є необхідним для подальшого удосконалення прогнозних моделей, які можуть забезпечити більш точне передбачення грозових явищ і їхніх наслідків. Аналіз даних за останні п'ять років, який здійснено в даній роботі, дозволяє виявити зміни у грозовій активності, а також визначити найбільш вразливі території, що є важливим для планування заходів щодо мінімізації ризиків і шкоди від таких явищ.

**Метою цього дослідження** є аналіз просторово-часового розподілу кількості блискавок “хмара-земля” (“Cloud-Ground”, CG) в Україні за період з травня по вересень 2017–2021 років, зокрема у кожній області країни, з урахуванням річних коливань. Такий підхід дозволяє виявити потенційно небезпечні регіони для подальших кліматичних і екологічних досліджень і для розвитку систем прогнозування небезпечних явищ.

## ДАНИ ТА МЕТОДИ

**Дані грозопеленгації.** Дослідження базується на щорічних спостереженнях за ударами блискавок у землю на території України протягом 2017–2021 рр. Для розрахунку були використані дані кількості блискавок за теплий період року — з травня по вересень, оскільки саме в цей період конвективна активність найінтенсивніша (Poręba, Taszarek, & Ustrnul, 2022). Джерелом інформації кількості блискавок були дані системи грозопеленгації, яка складається із датчиків, встановлених на 12 метеорологічних станціях по всій території України (Кривобок О. та ін., 2018). Система була встановлена в 2016 р. в рамках виконання тристороннього договору між американською компанією “Earth Networks”, Українським гідрометеорологічним центром і Українським гідрометеорологічним інститутом ДСНС України та НАН України. Дана система грозопеленгації інтегрована до загальної мережі ENTLN (Earth Networks Total Lightning Network). Ця система забезпечує фіксацію координат блискавок із високою просторовою та часовою точністю та ґрунтується на мережі наземних детекторів, які працюють у широкому частотному діапазоні (1–12 МГц) та реєструють як розряди “хмара-земля” (“Cloud-Ground”, CG), так і міжхмарні розряди (“Inter Cloud”, IC). Основні технічні параметри системи наведено у *табл. 1*.

Таблиця 1. Основні параметри системи ENTLN

| Параметр                                  | Опис   |
|---|--|
| Тип системи                               | Наземна глобальна мережа сенсорів для виявлення блискавок  |
| Принцип роботи                            | Визначення місця розряду за методом різниці часу прибуття сигналу (TOA — Time Of Arrival) з урахуванням амплітуди електромагнітного імпульсу |
| Діапазон частот                           | 1–12 МГц (широкосмугова реєстрація електромагнітних сигналів блискавок)  |
| Типи блискавок, що реєструються           | “Хмара-земля” (CG — Cloud-Ground) і міжхмарні (IC — InterCloud)  |
| Просторова точність                       | 0,5 км в середньому по країні  |
| Часова точність                           | до 1 мілісекунди   |
| Характеристики блискавок, що реєструються | Географічні координати, час (UTC), тип (CG чи IC), сила струму (кА), висота IC-розряду   |
| Частота оновлення даних                   | В реальному режимі часу  |
| Переваги                                  | Реєстрація як CG, так і IC розрядів; оперативна обробка; висока просторово-часова роздільність   |

Для аналізу інтенсивності блискавок на території України було розраховано:

- Суми блискавок CG за травень–вересень кожного року п’ятирічного періоду 2017–2021 і середнє значення за цей період для кожної області і для всієї України.
- Щільність блискавок CG (бл/км<sup>2</sup>) за травень–вересень кожного року за п’ятирічний період 2017–2021 і середнє значення за цей період для кожної області і для всієї України.

**Метеорологічні дані та циркуляційні показники.** Для аналізу циркуляційних умов, що супроводжували грозову активність, було використано дані атмосферного реаналізу ERA5 Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF). Були залучені середньомісячні значення наступних параметрів:

- Зональна ( $u$ ) та меридіональна ( $v$ ) компоненти вітру, що характеризують напрямок та інтенсивність повітряних потоків;
- Відносна завихреність ( $vo$ ), як індикатор циклонної/антициклонної активності та вертикальних рухів.

Розрахунок проводився для двох рівнів: 850 гПа (нижня тропосфера, рівень формування конвекції) та 250 гПа (верхня тропосфера, рівень струменевих течій). Дані були усереднені для теплого (травень–вересень) та холодного (жовтень–квітень) періодів у межах адміністративних кордонів областей України.

## РЕЗУЛЬТАТИ

**Основні результати.** Розрахунок кількості блискавок CG в Україні за період 2017–2021 років показав значні варіації як між різними областями, так

і протягом різних років. За результатами розрахунків, наданих у *табл. 2*, найбільша кількість блискавок спостерігається в Дніпропетровській, Одеській, Миколаївській та Херсонській областях, що свідчить про високу грозову активність у південних і центральних регіонах України. Такі області, як Волинська, Тернопільська та Сумська демонструють значно нижчу кількість грозових ударів. У *таблиці* відображені дані сум блискавок для областей в межах їх адміністративних кордонів.

Оскільки абсолютні значення кількості блискавок не відображають реальної інтенсивності грозової активності з огляду на різну площу областей, додатково було розраховано щільність блискавок — їх кількість на одиницю площі (*табл. 3*). Найвищі показники спостерігаються Одеській (1,34 бл/км<sup>2</sup>), Миколаївській (1,14 бл/км<sup>2</sup>), Запорізькій (1,15 бл/км<sup>2</sup>), Івано-Франківській (1,08 бл/км<sup>2</sup>) областях. Сумська область (0,54 бл/км<sup>2</sup>), Харківська (0,59 бл/км<sup>2</sup>) та Чернігівська область (0,63 бл/км<sup>2</sup>) мають найнижчі показники щільності. Середнє значення щільності блискавок CG по областях України за досліджуванний період також показано на діаграмі (*рис. 1*).

Середні значення кількості та щільності блискавок CG для областей України за п’ятирічний період представлено на *рис. 2*.

**Місячна варіація грозової активності.** Для більш детального аналізу сезонної динаміки блискавок було розраховано середні значення щільності ударів блискавок за кожен місяць теплого періоду (травень–вересень) протягом 2017–2021 рр. (*табл. 4*).

Аналіз показав, що найбільша грозова активність в Україні спостерігається у червні та липні, коли середні значення щільності блискавок перевищу-

Таблиця 2. **Загальна кількість блискавок “хмара-земля” (CG) в період травень–вересень 2017–2021 роки та середні значення по областях України**

| Область           | 2017   | 2018   | 2019   | 2020   | 2021   | Середнє значення |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| Чернігівська      | 37812  | 21204  | 15139  | 8213   | 17969  | 20069            |
| Чернівецька       | 10777  | 8291   | 6872   | 6175   | 5984   | 7617             |
| Черкаська         | 25468  | 27949  | 17577  | 7702   | 14656  | 18806            |
| Донецька          | 19479  | 31790  | 13687  | 17934  | 31029  | 23829            |
| Дніпропетровська  | 16600  | 46250  | 22452  | 19218  | 57264  | 32885            |
| Харківська        | 14683  | 19954  | 11663  | 15598  | 27462  | 18460            |
| Хмельницька       | 36285  | 17344  | 25780  | 11545  | 9890   | 20107            |
| Івано-Франківська | 20008  | 18439  | 13139  | 10694  | 12829  | 15026            |
| Херсонська        | 17101  | 40399  | 22486  | 19998  | 43485  | 29391            |
| Кіровоградська    | 21035  | 31345  | 23387  | 15537  | 28193  | 24408            |
| Крим              | 23492  | 38687  | 18641  | 18062  | 24730  | 25056            |
| Київська          | 31244  | 23178  | 19337  | 9059   | 20062  | 20759            |
| Луганська         | 25171  | 30342  | 8505   | 6561   | 22042  | 19254            |
| Львівська         | 25803  | 26709  | 22574  | 12633  | 17562  | 21100            |
| Миколаївська      | 25831  | 36264  | 20866  | 18945  | 37042  | 28042            |
| Одеська           | 56024  | 50417  | 32483  | 31254  | 51667  | 44484            |
| Полтавська        | 23987  | 33037  | 13666  | 10064  | 20390  | 20425            |
| Рівненська        | 28187  | 14483  | 15512  | 10158  | 7645   | 15265            |
| Сумська           | 22480  | 13018  | 10877  | 5082   | 12669  | 12845            |
| Тернопільська     | 20921  | 12281  | 7132   | 6454   | 8054   | 10987            |
| Вінницька         | 48621  | 29033  | 32167  | 11269  | 17580  | 27871            |
| Волинська         | 21107  | 11949  | 15602  | 7844   | 9059   | 13117            |
| Житомирська       | 43338  | 19640  | 34256  | 12126  | 14061  | 24798            |
| Закарпатська      | 19843  | 15994  | 12241  | 7575   | 11010  | 13452            |
| Запорізька        | 14606  | 40139  | 29158  | 21994  | 46794  | 31195            |
| Україна           | 649903 | 658136 | 465199 | 321694 | 569128 | 539248           |

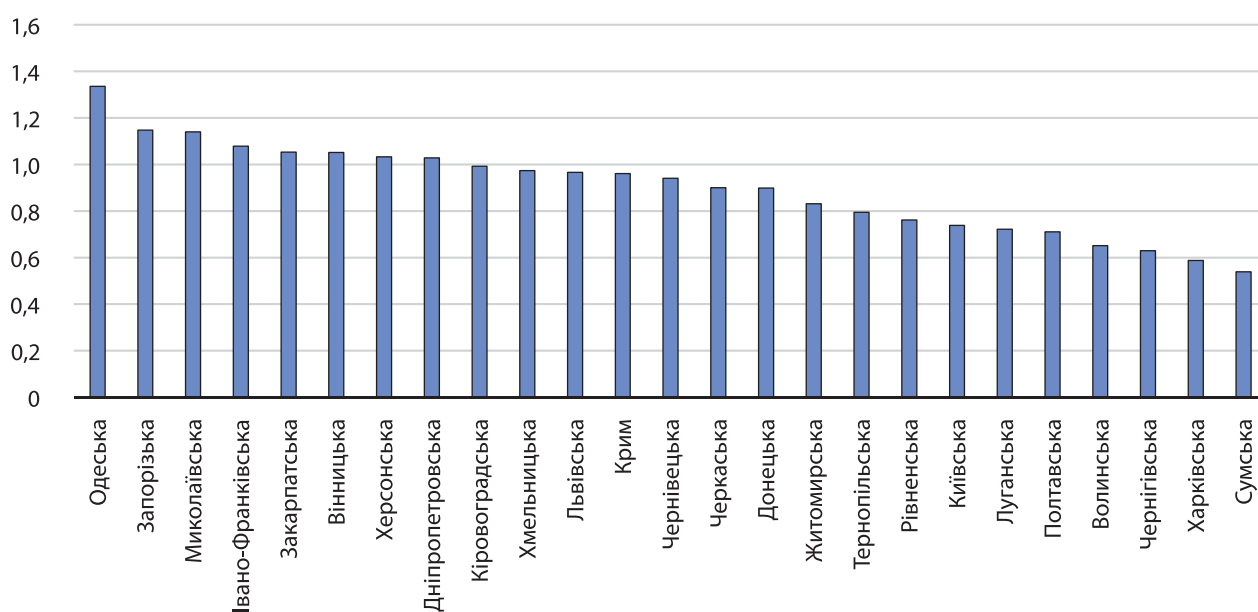


Рис. 1. Середнє значення щільності (бл/км2) в період травень–вересень 2017–2021 років по областях України

Таблиця 3. Щільність блискавок "хмара-земля" в період травень–вересень 2017–2021 років по областях України (кількість блискавок на 1 км<sup>2</sup>)

| Область           | Площа  | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | Середнє значення |
|-------------------|--------|------|------|------|------|------|------------------|
| Чернігівська      | 31865  | 1,19 | 0,67 | 0,48 | 0,26 | 0,56 | 0,63             |
| Чернівецька       | 8097   | 1,33 | 1,02 | 0,85 | 0,76 | 0,74 | 0,94             |
| Черкаська         | 20900  | 1,22 | 1,34 | 0,84 | 0,37 | 0,70 | 0,90             |
| Донецька          | 26517  | 0,73 | 1,20 | 0,52 | 0,68 | 1,17 | 0,90             |
| Дніпропетровська  | 31974  | 0,52 | 1,45 | 0,70 | 0,60 | 1,79 | 1,03             |
| Харківська        | 31415  | 0,47 | 0,64 | 0,37 | 0,50 | 0,87 | 0,59             |
| Хмельницька       | 20645  | 1,76 | 0,84 | 1,25 | 0,56 | 0,48 | 0,97             |
| Івано-Франківська | 13928  | 1,44 | 1,32 | 0,94 | 0,77 | 0,92 | 1,08             |
| Херсонська        | 28461  | 0,60 | 1,42 | 0,79 | 0,70 | 1,53 | 1,03             |
| Кіровоградська    | 24588  | 0,86 | 1,27 | 0,95 | 0,63 | 1,15 | 0,99             |
| Крим              | 26081  | 0,90 | 1,48 | 0,71 | 0,69 | 0,95 | 0,96             |
| Київська          | 28131  | 1,11 | 0,82 | 0,69 | 0,32 | 0,71 | 0,74             |
| Луганська         | 26684  | 0,94 | 1,14 | 0,32 | 0,25 | 0,83 | 0,72             |
| Львівська         | 21833  | 1,18 | 1,22 | 1,03 | 0,58 | 0,80 | 0,97             |
| Миколаївська      | 24598  | 1,05 | 1,47 | 0,85 | 0,77 | 1,51 | 1,14             |
| Одеська           | 33310  | 1,68 | 1,51 | 0,98 | 0,94 | 1,55 | 1,34             |
| Полтавська        | 28748  | 0,83 | 1,15 | 0,48 | 0,35 | 0,71 | 0,71             |
| Рівненська        | 20047  | 1,41 | 0,72 | 0,77 | 0,51 | 0,38 | 0,76             |
| Сумська           | 23834  | 0,94 | 0,55 | 0,46 | 0,21 | 0,53 | 0,54             |
| Тернопільська     | 13823  | 1,51 | 0,89 | 0,52 | 0,47 | 0,58 | 0,79             |
| Вінницька         | 26513  | 1,83 | 1,10 | 1,21 | 0,43 | 0,66 | 1,05             |
| Волинська         | 20144  | 1,05 | 0,59 | 0,77 | 0,39 | 0,45 | 0,65             |
| Житомирська       | 29832  | 1,45 | 0,66 | 1,15 | 0,41 | 0,47 | 0,83             |
| Закарпатська      | 12777  | 1,55 | 1,25 | 0,96 | 0,59 | 0,86 | 1,05             |
| Запорізька        | 27180  | 0,54 | 1,48 | 1,07 | 0,81 | 1,72 | 1,15             |
| Україна           | 603628 | 1,08 | 1,09 | 0,77 | 0,53 | 0,94 | 0,89             |

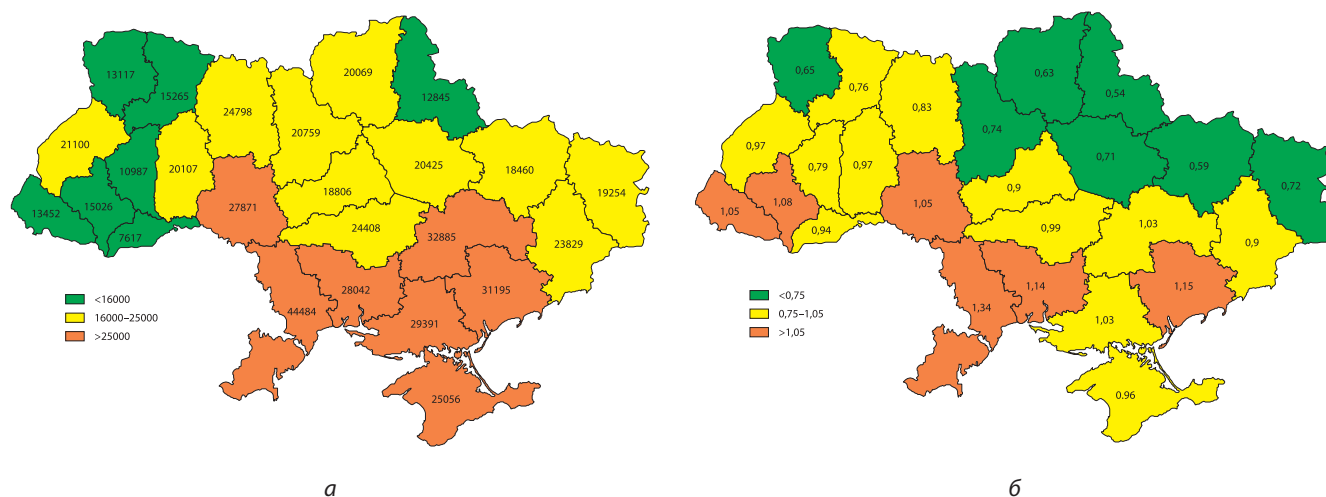


Рис. 2. Середнє значення кількості блискавок "хмара-земля" (CG) в період травень–вересень 2017–2021 роки по областях України (а) Середня багаторічна щільність ударів блискавок в землю, розрахована за теплий період п'яти років (б)

Таблиця 4. Середня місячна щільність блискавок (бл/км<sup>2</sup>) за 2017–2021 роки

| Область           | Площа | Травень | Червень | Липень | Серпень | Вересень |
|-------------------|-------|---------|---------|--------|---------|----------|
| Чернігівська      | 31865 | 0,06    | 0,17    | 0,20   | 0,09    | 0,11     |
| Чернівецька       | 8097  | 0,12    | 0,36    | 0,18   | 0,19    | 0,09     |
| Черкаська         | 20900 | 0,11    | 0,30    | 0,32   | 0,09    | 0,07     |
| Донецька          | 26517 | 0,09    | 0,31    | 0,34   | 0,09    | 0,03     |
| Дніпропетровська  | 31974 | 0,11    | 0,42    | 0,38   | 0,07    | 0,03     |
| Харківська        | 31415 | 0,08    | 0,23    | 0,18   | 0,06    | 0,02     |
| Хмельницька       | 20645 | 0,15    | 0,34    | 0,14   | 0,22    | 0,14     |
| Івано-Франківська | 13928 | 0,12    | 0,35    | 0,24   | 0,22    | 0,14     |
| Херсонська        | 28461 | 0,12    | 0,35    | 0,34   | 0,16    | 0,04     |
| Кіровоградська    | 24588 | 0,13    | 0,32    | 0,37   | 0,12    | 0,07     |
| Крим              | 26081 | 0,05    | 0,28    | 0,35   | 0,21    | 0,05     |
| Київська          | 28131 | 0,08    | 0,22    | 0,23   | 0,13    | 0,07     |
| Луганська         | 26684 | 0,07    | 0,28    | 0,21   | 0,09    | 0,06     |
| Львівська         | 21833 | 0,12    | 0,33    | 0,23   | 0,22    | 0,06     |
| Миколаївська      | 24598 | 0,14    | 0,41    | 0,35   | 0,15    | 0,07     |
| Одеська           | 33310 | 0,11    | 0,45    | 0,36   | 0,28    | 0,13     |
| Полтавська        | 28748 | 0,10    | 0,26    | 0,21   | 0,07    | 0,06     |
| Рівненська        | 20047 | 0,10    | 0,18    | 0,24   | 0,16    | 0,09     |
| Сумська           | 23834 | 0,10    | 0,16    | 0,15   | 0,06    | 0,07     |
| Тернопільська     | 13823 | 0,10    | 0,24    | 0,16   | 0,25    | 0,04     |
| Вінницька         | 26513 | 0,13    | 0,35    | 0,20   | 0,18    | 0,19     |
| Волинська         | 20144 | 0,08    | 0,16    | 0,23   | 0,14    | 0,04     |
| Житомирська       | 29832 | 0,11    | 0,23    | 0,17   | 0,21    | 0,11     |
| Закарпатська      | 12777 | 0,07    | 0,37    | 0,29   | 0,22    | 0,09     |
| Запорізька        | 27180 | 0,08    | 0,35    | 0,47   | 0,15    | 0,07     |

ють травневі показники у 2–4 рази. Це зумовлено максимальним розвитком конвекції у літній період, коли поєднуються високі температури та значна вологість повітря.

Найбільша щільність блискавок у червні зафіксована в Одеській (0,45 бл/км<sup>2</sup>), Дніпропетровській (0,41 бл/км<sup>2</sup>) та Миколаївській (0,42 бл/км<sup>2</sup>) областях. Подібна закономірність зберігається і в липні, коли інтенсивність грозових процесів залишається високою у південних і центральних областях (Кіровоградська (0,37 бл/км<sup>2</sup>), Дніпропетровська (0,38 бл/км<sup>2</sup>), Запорізька (0,47 бл/км<sup>2</sup>)).

У серпні активність поступово зменшується, але залишається помітною у західному регіоні (Тернопільська (0,25 бл/км<sup>2</sup>), Закарпатська (0,22 бл/км<sup>2</sup>), Хмельницька (0,22 бл/км<sup>2</sup>), Івано-Франківська (0,22 бл/км<sup>2</sup>), Львівська (0,22 бл/км<sup>2</sup>) та в південних районах країни (Одеська 0,28 бл/км<sup>2</sup>), що пов'язано з тривалішим збереженням підвищеної температури і вологи в цих регіонах.

Мінімальна активність блискавок спостерігається у вересні, коли щільність зменшується в 2–5 разів порівняно з літніми місяцями, що відповідає сезон-

ному зниженню температури й енергії нестійкості CAPE.

**Щорічні коливання.** Щорічні коливання кількості блискавок показали, що 2017 та 2018 роки мали найвищі показники активності по всій Україні. Наприклад, у 2017 році у Вінницькій області була зафіксована щільність 1,83 бл/км<sup>2</sup>, що є максималь-

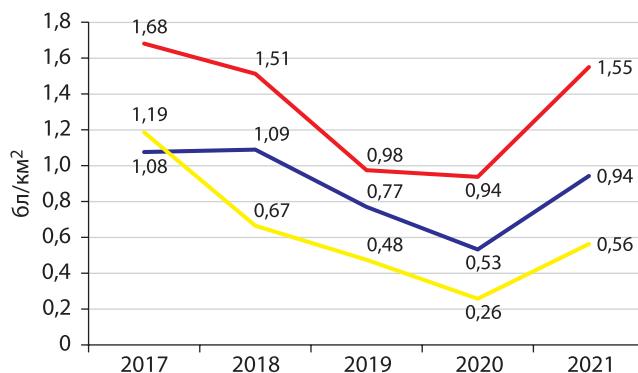


Рис. 3. Графік зміни щорічних значень щільності блискавок для території України за травень–вересень 2017–2021 років (синя лінія — для території України, жовта — Чернігівська область, червона — Одеська область)

ним значенням за п'ятирічний період. У 2019 та 2020 роках спостерігається зниження активності, особливо в південних і східних областях. Так у 2020 році в Одеській області, яка має найвище середнє значення щільності блискавок щороку, це значення склало 0,94 бл/км<sup>2</sup>. Зміна щорічних значень середньої щільності ударів блискавок для всієї України представлена на *рис. 3*.

## ОБГОВОРЕННЯ

**Просторові закономірності грозової активності в Україні.** Результати розрахунку та аналізу свідчать, що грозова активність в Україні має виражену регіональну диференціацію. Найвища щільність ударів блискавок спостерігається в Одеській (1,34 бл/км<sup>2</sup>), Запорізькій (1,15 бл/км<sup>2</sup>), Миколаївській (1,14 бл/км<sup>2</sup>), Івано-Франківській (1,08 бл/км<sup>2</sup>) областях, найнижча — у Сумській (0,54 бл/км<sup>2</sup>), Харківській (0,59 бл/км<sup>2</sup>) та Чернігівській (0,63 бл/км<sup>2</sup>).

Отримані значення щільності блискавок загалом узгоджуються із даними попередніх кліматологічних досліджень грозової діяльності на території України. Зокрема, у монографії "Клімат України" (Ліпінський, 2003) зазначено, що повторюваність грозових днів істотно вища у південних та західних областях, а у північних і східних регіонах — нижча. Це відповідає просторовим закономірностям, виявленим у нашому дослідженні. Водночас попередні методики, що ґрунтувалися на тривалості грозових днів або візуальних спостереженнях, відрізняються від інструментальних вимірювань грозопеленгаційної системи, тому пряме кількісне порівняння окремих показників не завжди коректне (Величко, 2014; Холопцев & Мацук, 2012; Федонюк et al., 2021; Заболотна et al., 2025).

Виявлена просторова диференціація грозової активності має як орографічне, так і циркуляційне обґрунтування. Аналіз поля вітру та відносної завихреності на рівнях 850 і 250 гПа свідчить про наявність регіональних особливостей у механізмах розвитку глибокої конвекції.

У південних областях України та Причорномор'ї підвищена щільність блискавок пов'язана з адвекцією теплого і вологого повітря із акваторії Чорного моря. За результатами аналізу циркуляційних параметрів, у цьому регіоні спостерігається поєднання слабкої меридіональної конвергенції у приземному шарі (компонента  $v$  на рівні 850 гПа становить близько  $-1,5$  м/с) із підвищеними значеннями позитивної відносної завихреності у верхній тропосфері (на рівні 250 гПа  $vo$  досягає приблизно  $(9,5-22,5) \times 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ ). Таке поєднання динамічних факторів сприяє розвитку глибокої конвекції та формуванню потужних фронтальних або мезомасштабних

конвективних систем висотою до 10–12 км, які характеризуються значною інтенсивністю розрядів типу "хмара–земля" (CG).

У Карпатському регіоні (зокрема в Івано-Франківській області) підвищена грозова активність значною мірою зумовлена орографічними чинниками. Попри наявність від'ємної відносної завихреності на рівні 850 гПа (близько  $-1,5 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ ), значну роль відіграє інтенсивний зональний перенос у нижній та середній тропосфері (приблизно 1,7–2,1 м/с). Західні повітряні потоки, взаємодіючи з гірськими масивами Карпат, зазнають вимушеного підняття, що сприяє формуванню численних локальних конвективних осередків. У таких умовах розвиваються купчасто-дощові хмари з відносно обмеженою вертикальною протяжністю (близько 4,5–5 км), у яких переважають внутрішньохмарні розряди (IC).

Водночас у північних і східних областях України (Сумська, Харківська, Чернігівська) щільність блискавок значно нижча. Це пов'язано з відносно стабільними атмосферними умовами, слабшими значеннями завихреності у верхній тропосфері (на рівні 250 гПа вони наближаються до нуля або набувають від'ємних значень, до  $-1,2 \times 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ ), а також меншою вертикальною нестійкістю повітря. Останнє проявляється у нижчих значеннях конвективно доступної потенціальної енергії (CAPE), що обмежує розвиток потужних висхідних потоків і, відповідно, інтенсивність грозових процесів.

**Часові тенденції та зв'язок із кліматичними змінами.** Аналіз міжрічної динаміки показав, що найбільшу кількість блискавок в Україні зареєстровано у 2018 році (658 тис.), а найменшу — у 2020 році (322 тис.). Порівняння кількості блискавок за 2017–2021 рр. із результатами попередніх досліджень свідчить, що спостережувані коливання загалом узгоджуються із тенденціями, описаними у роботах, присвячених багаторічній мінливості грозових днів в Україні (Величко, 2014; Мацук, 2013; Холопцев & Мацук, 2012). Зокрема, за даними значених досліджень, частота грозових днів істотно залежить від типу атмосферної циркуляції.

Результати проведеного аналізу динамічних характеристик атмосфери підтверджують цю залежність. Показано, що підвищена грозова активність частіше спостерігається за умов меридіональних циркуляційних процесів, які супроводжуються надходженням теплих і вологих повітряних мас із південних широт. У теплий період року (травень–вересень) такі умови проявляються у помірних значеннях зональної компоненти вітру ( $u$ ) на рівні 250 гПа (приблизно 8–9 м/с) та наявності позитивної відносної завихреності у верхній тропосфері порядку  $10^{-5}$ – $10^{-6} \text{ c}^{-1}$  над південними та централь-

ними регіонами України. Поєднання цих факторів створює динамічні передумови для формування висхідних рухів повітря та розвитку глибокої конвекції.

Натомість переважання інтенсивного зонального переносу, характерного для більш стабільних циркуляційних режимів, зазвичай супроводжується зменшенням повторюваності грозових явищ. Зокрема, у холодний період року посилення зональної компоненти вітру на рівні 250 гПа до 12,5–14,0 м/с у поєднанні з від'ємною меридіональною компонентою на рівні 850 гПа сприяє стабілізації атмосфери та пригніченню конвективних процесів.

Згідно з результатами попередніх досліджень, 2018 рік характеризувався найбільшою кількістю грозових днів (Федонюк, Федонюк, & Павлусь, 2021; Заболотна et al., 2025). Було показано, що у цей рік кількість днів із грозою перевищувала кліматичну норму приблизно на 25–30%, особливо у південних і західних областях України (Вінницька, Тернопільська, Закарпатська, Одеська, Миколаївська, Херсонська) (Федонюк, Федонюк, & Павлусь, 2021). Підвищена активність була зумовлена посиленням конвективних процесів і збільшенням повторюваності внутрішньомасових гроз, що пов'язано з переважанням меридіональних циркуляційних процесів і прогріванням нижніх шарів атмосфери. У таких умовах формувалась підвищена вертикальна нестійкість повітря, що проявляється у збільшенні значень конвективно доступної потенціальної енергії (CAPE) та сприяє розвитку глибокої конвекції.

Також у літній період 2018–2019 рр. в Одесі спостерігалася підвищена кількість як фронтальних, так і внутрішньомасових гроз, зокрема пов'язаних із проходженням теплих фронтів. Водночас 2019 рік виявився дещо менш активним, що, ймовірно, пов'язано з чергуванням циклонічних і антициклонічних періодів, унаслідок чого грозова діяльність мала більш локальний і короткочасний характер.

2020 рік, навпаки, виявився мінімальним за кількістю грозових днів і блискавок. Це може пояснюватися переважанням стійкого антициклонічного режиму, який супроводжувався стабілізацією атмосфери, трансформацією поля відносної завихреності та зміщенням струменевих течій у верхній тропосфері (рівень 250 гПа), що пригнічувало розвиток глибокої конвекції (Величко, 2014; Холопцев & Мацук, 2012).

Попередні наукові дослідження також свідчать, що 2020 рік характеризувався нетиповими метеорологічними та циркуляційними умовами в багатьох регіонах світу. Фіксувалися аномалії температури та вологості, перебудова атмосферної циркуляції, зміщення зон конвекції та трансформація струменевих

течій, що безпосередньо впливало на умови формування глибокої конвекції (Schumann, Füllekrug, & Satori, 2025; Blunden & Boyer, 2021).

Додатково на атмосферні процеси могли вплинути антропогенні фактори, пов'язані зі зниженням рівня забруднення атмосфери у період пандемії COVID-19 протягом 2020–2021 років (Pinto Neto, Pinto, & Pinto, 2020; Gole & Midya, 2021; Liu et al., 2024; Pérez Invernón et al., 2021; Latham et al., 2021; Yusfiandika et al., 2021). У цей час у багатьох регіонах світу відзначалося істотне скорочення викидів оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ), дрібнодисперсних аерозольних частинок ( $\text{PM}_{2.5}$  та  $\text{PM}_{10}$ ), а також зменшення концентрацій вуглекислого газу та легких органічних сполук у приземному шарі повітря. Зниження аерозольного навантаження призводило до зменшення кількості конденсаційних ядер хмар і певної трансформації мікрофізичних процесів у хмарності, що могло впливати на інтенсивність електризації купчасто-дощових хмар і, відповідно, грозову активність.

Таким чином, відмінності грозової активності між окремими роками пояснюються співвідношенням зональних і меридіональних типів атмосферної циркуляції, відповідними змінами поля вітру та відносної завихреності на різних висотних рівнях, а також варіаціями термодинамічної нестійкості атмосфери. Це узгоджується з висновками попередніх досліджень, у яких підкреслюється вирішальна роль циркуляційних процесів у просторово-часовій мінливості грозової діяльності в Україні (Величко, 2014; Холопцев & Мацук, 2012; Федонюк, Федонюк, & Павлусь, 2021).

**Сезонна структура грозової активності.** Отримані результати місячного розподілу підтверджують, що найбільша кількість блискавок в Україні припадає на літні місяці — червень і липень. Саме в цей період спостерігається максимальний розвиток термічної конвекції, підвищена температура поверхні землі та значні запаси водяної пари у тропосфері. Такі умови сприяють утворенню глибоких конвективних хмар і виникненню найінтенсивніших гроз.

З точки зору динаміки атмосфери, літній максимум грозової активності пов'язаний із сезонною перебудовою циркуляції у середній та верхній тропосфері. У теплий період року над територією України спостерігається відносно послаблення зонального переносу у верхній тропосфері (рівень 250 гПа), коли швидкість зональної компоненти вітру ( $u$ ) зазвичай становить близько 8–9 м/с. За таких умов збільшується роль мезомасштабних та внутрішньомасових процесів, а у полі відносної завихреності частіше формуються області слабкої позитивної

завихреності порядку  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  с<sup>-1</sup>, що сприяє розвитку висхідних рухів повітря та активізації глибокої конвекції. У нижній тропосфері (рівень 850 гПа) у цей період посилюється адвекція теплого та вологого повітря з південних напрямків, що додатково підвищує вертикальну нестійкість атмосфери.

Зниження кількості блискавок у серпні — вересні зумовлене поступовим зменшенням температурного контрасту між підстильною поверхнею та вищими шарами атмосфери, а також зниженням конвективно доступної потенціальної енергії (CAPE). Одночасно поступово посилюється зональна складова атмосферної циркуляції, що сприяє стабілізації тропосфери та обмежує розвиток глибокої конвекції.

Цей сезонний цикл повністю узгоджується з результатами попередніх досліджень для території України (Величко, 2014; Холопцев & Мацук, 2012; Федонюк, Федонюк, & Павлусь, 2021) та Польщі (Poręba, Taszarek, & Ustrnul, 2022), де літній максимум грозової активності є характерною ознакою помірно-континентального клімату.

Місячні варіації показують, що південні області (Одеська, Миколаївська, Херсонська, Дніпропетровська) залишаються активними протягом усього теплого періоду, тоді як у північних регіонах грози мають більш короткий сезон. Це свідчить про триваліше збереження сприятливих умов для розвитку конвекції на півдні країни, що може бути наслідком поєднання кількох факторів: впливу Чорного моря як джерела додаткової вологості, підвищених значень температури підстильної поверхні, а також більшої тривалості періоду із підвищеними значеннями CAPE.

Отже, сукупність отриманих результатів та даних попередніх досліджень свідчить, що регіональні відмінності грозової активності в Україні зумовлені поєднанням трьох головних чинників: циркуляційних — пов'язаних із сезонною перебудовою атмосферної циркуляції та змінами поля вітру і завихреності у тропосфері; орографічних — наявністю гірських і підвищених територій (Карпати, Поділля), що активізують вертикальні потоки; та термодинамічних — підвищеною температурою поверхні й значним вмістом водяної пари в атмосфері, які за високих значень конвективно доступної потенціальної енергії (CAPE) сприяють формуванню інтенсивних висхідних рухів і високій частоті грозових явищ у теплий період року. Додатково на грозову активність можуть впливати антропогенні чинники.

## ВИСНОВКИ

На основі даних системи грозопеленгації за травень–вересень 2017–2021 років встановлено, що

загальна кількість ударів блискавок на території України за п'ятирічний період становить 2 696 239. Середня річна щільність блискавок за досліджуваний період склала 0,89 бл/км<sup>2</sup>.

Просторовий розподіл грозової активності характеризується чітко вираженою регіональною диференціацією. Найвища середня річна щільність блискавок спостерігається в Одеській (1,34 бл/км<sup>2</sup>), Запорізькій (1,15 бл/км<sup>2</sup>) та Миколаївській (1,14 бл/км<sup>2</sup>) областях, тоді як найнижчі значення зафіксовані у Сумській (0,54 бл/км<sup>2</sup>), Харківській (0,59 бл/км<sup>2</sup>) та Чернігівській (0,63 бл/км<sup>2</sup>) областях.

Аналіз просторових особливостей показав, що інтенсивність грозової діяльності значною мірою визначається станом динамічних параметрів тропосфери та їх взаємодією з регіональними фізико-географічними умовами. Зокрема:

- у південних регіонах підвищена активність пов'язана з поєднанням позитивної відносної завихреності у верхній тропосфері (рівень 250 гПа) та меридіональної конвергенції у нижніх шарах атмосфери, що створює сприятливі умови для розвитку глибокої конвекції;
- у західних регіонах важливу роль відіграє орографічно-динамічний чинник, де інтенсивність грозової діяльності пов'язана з взаємодією зонального переносу повітряних мас із гірськими системами Карпат;
- мінімуми грозової активності у північно-східних областях пояснюються більш стабільним станом атмосфери та низькими або від'ємними значеннями відносної завихреності, що обмежує розвиток висхідних рухів і глибокої конвекції.

Міжрічна мінливість грозової активності також тісно пов'язана з особливостями атмосферної циркуляції. Найбільшу кількість блискавок зафіксовано у 2018 році (658 тис.), що пов'язано з активізацією меридіональних процесів і сприятливими умовами для розвитку внутрішньомасових гроз. Найменшу кількість блискавок відмічено у 2020 році (322 тис.), що може пояснюватися переважанням стійкого антициклонального режиму, перебудовою поля завихреності у верхній тропосфері та можливим впливом зниження аерозольного навантаження в атмосфері у період пандемії COVID-19.

Сезонна структура грозової активності характеризується вираженим літнім максимумом, який припадає на червень–липень. У цей період поєднання високих температур підстильної поверхні, значного вмісту водяної пари в атмосфері та підвищених значень конвективно доступної потенціальної енергії (CAPE) створює сприятливі умови для розвитку глибокої конвекції та формування інтенсивних грозових процесів.

Таким чином, просторово-часова мінливість грозової активності на території України формується під впливом комплексу факторів, серед яких про-

відну роль відіграють атмосферна циркуляція, орографічні особливості території та термодинамічна нестійкість атмосфери.

## ЛІТЕРАТУРА

- Величко, С.А. (2014). Сезонна мінливість грозової діяльності в Україні у зв'язку з особливостями атмосферної циркуляції. *Український гідрометеорологічний журнал*, **14**, 47–55.
- Мацук, Ю.М. (2013). Зміни грозової активності на території України в ХХ та на початку ХХІ століття. *Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Серія "Геологія. Географія. Екологія"*, **39**, 147–151.
- Chernokulsky, A., Shikhov, A., Yarinich, Y., & Sprygin, A. (2023). An empirical relationship among characteristics of severe convective storms, their cloud-top properties and environmental parameters in Northern Eurasia. *Atmosphere*, **14**(1), Article 174.
- Feldmann, M., Blanc, M., Brennan, K.P., Thurnherr, I., et al. (2025). European supercell thunderstorms — an underestimated current threat and an increasing future hazard. *arXiv preprint arXiv: 2503.07466v1* [physics.ao-ph].
- Pilorz, W., Taszarek, M., Kolendowicz, L., et al. (2024). Comparing ERA5 convective environments associated with hailstorms in Poland between 1948–1955 and 2015–2022. *Atmospheric Research*, **298**, Article 107179.
- Холопцев, А.В., & Мацук, Ю.М. (2012). Анализ современных тенденций пространственно-временной изменчивости повторяемости грозовых дней в Украине. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, **1–2**, 13–19.
- Недострелова, Л.В., & Чумаченко, В.В. (2021). Часовий розподіл гроз на АМСЦ Одеса на початку ХХІ століття. *Український гідрометеорологічний журнал*, **27**, 16–23.
- Федонюк, В.В., Федонюк, М.А., & Павлусь, А.М. (2021). Дослідження грозової діяльності на Волині та в Україні за даними онлайн-ресурсу Blitzortung. *Вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Серія: Географічні науки*, **9**, 37–46.
- Poręba, S., Taszarek, M., & Ustrnul, Z. (2022). Diurnal and seasonal variability of ERA5 convective parameters in relation to lightning flash rates in Poland. *Weather and Forecasting*, **37**(8), 1447–1467.
- Agayar, O., Gospodinova, K., Shmakina, A., & Martius, O. (2024). Precipitation extremes in Ukraine from 1979 to 2019: Climatology, large-scale flow conditions, and moisture sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **24**(2), 411–432.
- Кривобок, А.А., Кривошеїн, А.О., Коман, М.М., & Крупа, Є.О. (2018). Український сегмент системи грозопеленгації ENTLN. *Український гідрометеорологічний журнал*, **21**, 45–53.
- Заболонна, О.С., Кривошеїн, О.О., Кривобок, О.А., & Крупа, Є.О. (2025). Просторово-часовий розподіл небезпечних сухих гроз в Україні. *Український географічний журнал*, **2**(130), 38–46. <https://doi.org/10.15407/ugz2025.02.038>
- Pinto Neto, O., Pinto, I.R.C.A., & Pinto, O. Jr. (2020). Lightning during the COVID-19 pandemic in Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, **211**, Article 105463. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105463>
- Gole, P.K., & Midya, S.K. (2021). Association of pre-monsoon CG lightning activity and some surface pollutants in different Indian cities around the COVID-19 lockdown year 2020. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, **87**(4), 657–667. <https://doi.org/10.1007/s43538-021-00052-3>
- Liu, X., et al. (2024). Reduction in global lightning activity during the COVID-19 pandemic (preprint). Research Square.
- Pérez-Invernón, F.J., Huntrieser, H., Gordillo-Vázquez, F.J., & Soler, S. (2021). Influence of the COVID-19 lockdown on lightning activity in the Po Valley. *Atmospheric Research*, **263**, 105808. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021>.
- Latham, J., Blyth, A., Christian, H., Deierling, W., Dye, J., Gadian, A., et al. (2021). Global warming and lightning flash rate. *AGU Fall Meeting Abstracts*, AE12A-02.
- Yusfiandika, F., Lim, S.C., Gomes, C., Chockalingam, A., & Cheng Pay, L. (2021). Lightning behaviour during the COVID-19 pandemic [version 3; peer review: 2 approved]. *F1000Research*, **10**, Article 906. <https://doi.org/10.12688/f1000research.70650.3>
- Blunden, J., & Boyer, T. (Eds.). (2021). State of the Climate in 2020. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **102**(8), S1–S475. <https://doi.org/10.1175/2021BAMSStateoftheClimate.1>
- Schumann, U., Füllekrug, M., & Satori, G. (2025). Contributions of lightning to long-term trends and inter-annual variability in global atmospheric chemistry constrained by Schumann resonance observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **25**(14), 8929–8951. <https://doi.org/10.5194/acp-25-8929-2025>
- Ліпінський, В.М. (2003). Клімат України. Київ: Вид-во Раєвського.

## REFERENCES

- Velychko, S.A. (2014). Seasonal variability of thunderstorm activity in Ukraine in relation to the features of atmospheric circulation. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, **14**, 47–55.
- Matsuk, Y.M. (2013). Changes in thunderstorm activity in Ukraine during the 20<sup>th</sup> and early 21<sup>st</sup> centuries. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, **39**, 147–151.
- Chernokulsky, A., Shikhov, A., Yarinich, Y., & Sprygin, A. (2023). An empirical relationship among characteristics of severe convective storms, their cloud-top properties, and environmental parameters in Northern Eurasia. *Atmosphere*, **14**(1), Article 174.
- Feldmann, M., Blanc, M., Brennan, K.P., Thurnherr, I., et al. (2025). European supercell thunderstorms — an underestimated current threat and an increasing future hazard. *arXiv preprint arXiv: 2503.07466v1* [physics.ao-ph].
- Pilorz, W., Taszarek, M., Kolendowicz, L., et al. (2024). Comparing ERA5 convective environments associated with hailstorms in Poland between 1948–1955 and 2015–2022. *Atmospheric Research*, **298**, Article 107179.
- Kholoptsev, A.V., & Matsuk, Y.M. (2012). Analysis of current trends in the spatio-temporal variability of thunderstorm day recurrence in Ukraine. Human and Environment. *Problems of Neoeology*, **1–2**, 13–19.
- Nedostrelava, L.V., & Chumachenko, V.V. (2021). Temporal distribution of thunderstorms at the AMSU Odessa at the beginning of the 21<sup>st</sup> century. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, **27**, 16–23.
- Fedoniuk, V.V., Fedoniuk, M.A., & Pavlus, A.M. (2021). Thunderstorm activity research in Volyn and Ukraine based on Blitzortung online resources. *Bulletin of Lesya Ukrainka East European National University. Series: Geographical Sciences*, **9**, 37–46.

- Poręba, S., Taszarek, M., & Ustrnul, Z. (2022). Diurnal and seasonal variability of ERA5 convective parameters in relation to lightning flash rates in Poland. *Weather and Forecasting*, **37**(8), 1447–1467.
- Agayar, O., Gospodinova, K., Shmakin, A., & Martius, O. (2024). Precipitation extremes in Ukraine from 1979 to 2019: Climatology, large-scale flow conditions, and moisture sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **24**(2), 411–432.
- Kryvobok, A.A., Kryvoshein, A.O., Koman, M.M., & Krupa, E.O. (2018). Ukrainian segment of the ENTLN lightning detection system. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, **21**, 45–53.
- Zabolotna, O.S., Kryvoshein, O.O., Kryvobok, O.A., & Krupa, E.O. (2025). Spatio-temporal distribution of dangerous dry thunderstorms in Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*, **2**(130), 38–46. <https://doi.org/10.15407/ugz2025.02.038>
- Pinto Neto, O., Pinto, I.R.C.A., & Pinto, O. Jr. (2020). Lightning during the COVID-19 pandemic in Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, **211**, Article 105463. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105463>
- Gole, P.K., & Midya, S.K. (2021). Association of pre-monsoon CG lightning activity and some surface pollutants in different Indian cities around the COVID-19 lockdown year 2020. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, **87**(4), 657–667. <https://doi.org/10.1007/s43538-021-00052-3>
- Liu, X., et al. (2024). Reduction in global lightning activity during the COVID-19 pandemic (preprint). Research Square.
- Pérez-Invernón, F.J., Huntrieser, H., Gordillo-Vázquez, F.J., & Soler, S. (2021). Influence of the COVID-19 lockdown on lightning activity in the Po Valley. *Atmospheric Research*, **263**, 105808. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105808>
- Latham, J., Blyth, A., Christian, H., Deierling, W., Dye, J., Gadian, A., et al. (2021). Global warming and lightning flash rate. *AGU Fall Meeting Abstracts*, AE12A-02.
- Yusfiandika, F., Lim, S.C., Gomes, C., Chockalingam, A., & Cheng Pay, L. (2021). Lightning behaviour during the COVID-19 pandemic [version 3; peer review: 2 approved]. *F1000Research*, **10**, Article 906. <https://doi.org/10.12688/f1000research.70650.3>
- Blunden, J., & Boyer, T. (Eds.). (2021). State of the Climate in 2020. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **102**(8), S1–S475. <https://doi.org/10.1175/2021BAMSStateoftheClimate.1>
- Schumann, U., Füllekrug, M., & Satori, G. (2025). Contributions of lightning to long-term trends and inter-annual variability in global atmospheric chemistry constrained by Schumann resonance observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **25**(14), 8929–8951. <https://doi.org/10.5194/acp-25-8929-2025>
- Lipinsky, V.M. (2003). Climate of Ukraine. Kyiv: Raevsky Publishing House.

## ANALYSIS OF THE SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF LIGHTNING STRIKES IN UKRAINE FOR 2017–2021

**Olena Zabolotna**

ORCID: 0009-0009-6338-7672

[zabolotnaolena@ukr.net](mailto:zabolotnaolena@ukr.net)

**Oleksandr Kryvoshein**

ORCID: 0000-0001-5029-4228

[krivoshein@uhmi.org.ua](mailto:krivoshein@uhmi.org.ua)

**Oleksii Kryvobok**

ORCID: 0000-0002-1730-1809

[kryvobok@uhmi.org.ua](mailto:kryvobok@uhmi.org.ua)

Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

This article presents the results of calculations and analysis of the spatio-temporal distribution of “cloud-ground” lightning strikes in Ukraine during the period 2017–2021, based on data from the lightning detection system of the Ukrainian Hydrometeorological Institute, which includes 12 sensors located in different regions of the country. The total number of ground lightning strikes and their density (number of lightning strikes per 1 km<sup>2</sup> — I/km<sup>2</sup>) within each administrative region were

analyzed. The average lightning density over the five-year period was 0.89 per 1 km<sup>2</sup>, with an average annual number of approximately 539,000 lightning strikes. The highest lightning densities were observed in Odesa (1.34 I/km<sup>2</sup>), Zaporizhzhia (1.15 I/km<sup>2</sup>), Mykolaiv (1.14 I/km<sup>2</sup>), Ivano-Frankivsk (1.08 I/km<sup>2</sup>), Vinnytsia (1.05 I/km<sup>2</sup>), and Zakarpattia (1.05 I/km<sup>2</sup>) regions. The lowest values were recorded in Sumy (0.54 I/km<sup>2</sup>), Kharkiv (0.59 I/km<sup>2</sup>), Chernihiv (0.63 I/km<sup>2</sup>), and Volyn (0.65 I/km<sup>2</sup>) regions. The greatest total number of lightning strikes across Ukraine was registered in 2018 (658,000), while the lowest was in 2020 (322,000). It was additionally established that the seasonal maximum of thunderstorm activity occurs in June–July, when the most intense convective systems are formed. Regional differences in the intensity of cloud-to-ground lightning discharges are based on the combination of thermodynamic and orographic factors. The analysis of interannual variability revealed a strong dependence of lightning occurrence on the type of atmospheric circulation and the conditions favorable for the development of atmospheric convection. The obtained results enhance the understanding of contemporary features of thunderstorm activity in Ukraine and can be used to assess territories in terms of lightning strike risk, improve early-warning systems, and support safety planning. Furthermore, they may serve as a basis for further research in climate monitoring and the analysis of extreme atmospheric phenomena.

**Keywords:** lightning, thunderstorm activity, lightning strike density, spatio-temporal distribution, lightning detection.



**А.П. Уманець**ORCID: 0009-0008-4867-4430  
umanets@uhmi.org.ua**М.В. Савенець**ORCID: 0000-0001-9429-6209  
savenets@uhmi.org.ua

УДК 551.510.413

DOI:

## ВЕРТИКАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ОЗОНУ ВЕРХНЬОЇ ТРОПОСФЕРИ — НИЖНЬОЇ СТРАТОСФЕРИ НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ РЕАНАЛІЗУ EAC4

Український  
гідрометеорологічний  
інститут ДСНС України  
та НАН України,  
Київ, Україна

У статті розглянуті вертикальний розподіл озону ( $O_3$ ) над територією України в шарі верхньої тропосфери — нижньої стратосфери, його сезонна мінливість та міжрічні тенденції. Дослідження базується на даних даних реаналізу Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF) Atmospheric Composition Reanalysis 4 (EAC4) за період 2003–2023 рр. Встановлено, що вертикальний розподіл  $O_3$  нижче ізобаричного рівня 30 гПа формується за переважаючої ролі циркуляції Брюера-Добсона, тоді як вище цього рівня визначальними стають фотохімічні реакції. За даними EAC4 максимуми  $O_3$  досягають середніх значень 12 мг/кг. Виявлено, що реаналіз EAC4 завищує рівні, на яких спостерігається максимум вмісту  $O_3$  (10–20 гПа), у порівнянні із середніми висотами за даними спостережень (30–50 гПа). За досліджуваний період зафіксовано зменшення  $O_3$  в шарі 50–100 гПа (16–20 км), що найбільш інтенсивно відбувається у літній та зимовий сезони, із інтенсивністю зменшення 0,02 мг/кг за рік. Натомість вище рівня 10 гПа (вище 30 км),  $O_3$  зростає за рахунок міжрічних змін весняного сезону з тенденціями до зростання приблизно на 0,03 мг/кг за рік. Результати статті доповнюють уявлення про вертикальний розподіл  $O_3$  над територією України і причини його варіацій, та обговорюють недоліки наявні в реаналізі EAC4.

**Ключові слова:** озоновий шар, вертикальний профіль, циркуляція Брюера-Добсона, мінливість.

### ВСТУП

Озоновий шар Землі відіграє ключову роль у поглинанні шкідливого ультрафіолетового (УФ) опромінення (Barnes et al., 2019). Як наслідок фотохімічних процесів, що при цьому протікають, відбувається вплив озону ( $O_3$ ) на термічний режим нижньої стратосфери (Shangguan et al., 2019). Ця роль озонового шару, а також факт антропогенного впливу на його зменшення через викиди озоноруйнуючих речовин, обумовлює наявність у світі регулярного моніторингу та аналіз просторово-часових змін  $O_3$  (Rolf, 2009).

У той час як основна увага завжди приділяється полярним районам, де формуються озонові дірки (Hartmann, 2022; Hu et al., 2023;), вивчення розподілу  $O_3$  у помірних широтах сфокусовано переважно на дослідженні формування озонового шару у взаємодії із загальною циркуляцією Брюера-Добсона (van Noije et al., 2004), природними та антропогенними озоноруйнуючими речовинами (Fernandez et al., 2024), та для прикладних задач прогнозування й моніторингу високих рівнів УФ-опромінення на регіональному масштабі (Khanna et al., 2022). У позаполярних широтах саме циркуляції Брюера-Добсона приділяється найбільша увага при вивченні динаміки озонового шару. Циркуляція Брюера-Добсона забезпечує тропосферно-стратосферний обмін у тропічних широтах і транспортує це повітря до

помірних та високих широт (Butchart, 2014). При цьому саме завдяки такому динамічному чиннику стратосфера отримує значну частину озоноруйнуючих речовин (Roscoe, 2006).

Значна кількість досліджень присвячена аналізу загального вмісту  $O_3$ , що виконується на основі даних наземних (Staehelin et al., 2018) і супутникових (Cracknell & Varotsos, 2012) спостережень, а також результатах модельних розрахунків (Galytska et al., 2019; Shi et al., 2022). Над територією України на основі наземних спостережень, загальний вміст  $O_3$  продовжує активно досліджуватися на станції Київ-Голосіїв (Грицай та Міліневський, 2018; Andrienko et al., 2021), що наразі є єдиною точкою моніторингу після припинення спостережень на станціях гідрометеорологічних організацій (Дворецька, 2012). Як наслідок малої кількості пунктів спостережень, значна кількість робіт проводиться лише на основі даних супутникового зондування (Дворецька та ін., 2021; Могильчак та Міліневський, 2017).

На відміну від загального вмісту  $O_3$ , його вертикальний розподіл над територією України досліджується значно менше. Основні роботи із дослідженням профілів  $O_3$  проведені за даними станції Київ-Голосіїв (Andrienko et al., 2021; Milinevsky et al., 2013; 2022), у тому числі із залученням даних реаналізу Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) (Milinevsky

et al., 2022). На основі цих спостережень, виявлено сильну варіативність висоти з максимумом  $O_3$  на весні, та можливість формування подвійного максимуму в цей час (Milinevsky et al., 2013). При цьому в середньому найвищі концентрації  $O_3$  зафіксовані на висоті близько 20 км (Andrienko et al., 2021). У міжрічному часовому масштабі виявлено негативні тренди, що узгоджуються із результатами інших досліджень (Milinevsky et al., 2022). Ці дослідження залишаються ключовими для розуміння змін вертикального вмісту  $O_3$  над територією України. Враховуючи, наявність інших джерел інформації та активне використання у світі реаналізів програми Copernicus, необхідним є розширення досліджень масивів наявної інформації щодо можливості їх використання для практичних задач.

**Метою досліджень** є встановлення закономірностей вертикального розподілу  $O_3$  над територією України у верхній тропосфері — нижній стратосфері, його сезонних та міжрічних варіацій на основі багаторічних даних модельного реаналізу European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Atmospheric Composition Reanalysis 4 (EAC4). Стаття структурована наступним чином: після опису початкових даних та методики досліджень, наведено аналіз середнього багаторічного розподілу  $O_3$  та сезонні відмінності вертикальних профілів. У останній частині статті проаналізовано міжрічні тренди змін  $O_3$  на різних висотах.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі дослідження проведено на основі щомісячних даних реаналізу Європейського центру середньострокових прогнозів погоди ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4 (EAC4) (Inness et al., 2019), дані якого поширюються у вільному доступі (<https://ads.atmosphere.copernicus.eu/datasets/cams-global-reanalysis-eac4-monthly?tab=overview>, дата звернення 20.02.2026 р.). EAC4 — це глобальний реаналіз хімічного складу атмосфери, що поєднує змодельовану інформацію із асимільованими даними наземних спостережень. У зв'язку з тим, що дані наземного моніторингу зазнавали значних змін і модернізації впродовж останніх десятиліть, визначено, що якісно провести асиміляцію можливо починаючи з 2003 р. (Inness et al., 2019). Саме цим фактом обумовлений початок архіву реаналізу EAC4. Незважаючи на те, що станом на сьогодні реаналіз містить дані до 2025 року включно, у дослідженнях використано період із 2003 по 2023 рр., що пов'язано з наявними масивами даних на початок досліджень.

Вихідні дані реаналізу EAC4 мають горизонтальну роздільну здатність  $0,75^\circ \times 0,75^\circ$  та 25 вертикальних

ізобаричних рівнів із 1000 гПа до 1 гПа. Так як метою дослідження роботи був аналіз  $O_3$ , який виступає у ролі озонового шару, а не приземної забруднюючої речовини, найнижчий ізобаричний рівень обрано 200 гПа (приблизно 12 км) у верхній тропосфері.

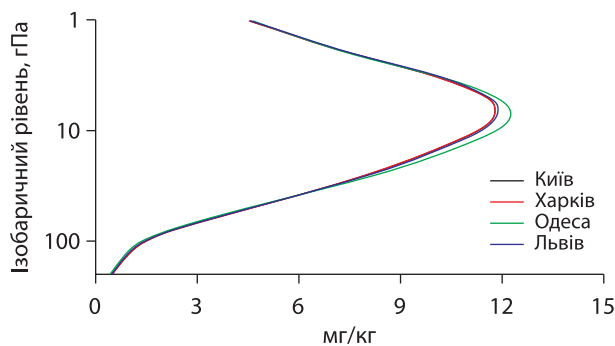
Задля якісного співставлення вертикальних профілів, додатково використано інформацію про відновлені профілі  $O_3$ , що розраховуються на основі алгоритмів обробки супутникового зондування The Global Ozone Monitoring Experiment 2 (Metop-C/GOME-2) service Tropospheric Emission Monitoring Internet Service (TEMIS) (<https://www.temis.nl/acsaf/index.php>, дата звернення 06.02.2026).

Розрахунки та аналіз проведено в усіх комірках сітки реаналізу, що покривають територію України, а також значно більшу область для аналізу просторового розподілу, що охоплювала більшу частину території Європи ( $25\text{--}75^\circ$  пн.ш.,  $0\text{--}60^\circ$  сх.д.). З метою представлення вертикальних профілів та відмінностей, які спостерігаються над територією України, обрано 4 комірки сітки реаналізу, які співпадають із розташуванням українських міст: Києва, Харкова, Одеси та Львова. Таким чином вдалося визначити типові вертикальні профілі півночі, сходу, півдня та заходу території України. Так як озоновий шар характеризується досить однорідним просторовим розподілом (Дворецька та ін., 2021), цих точок достатньо для отримання повної картини змін, які характерні для вертикального розподілу  $O_3$  над територією України.

Дослідження проводилися із використанням методів статистичної обробки часових рядів. Середні багаторічні значення обчислено для загального періоду та з розподілом за окремими сезонами. Для оцінювання тенденцій змін  $O_3$  обчислено лінійні тренди із перевіркою значущості за критерієм Фішера із 95% рівнем забезпеченості результату.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

**1. Середній багаторічний розподіл  $O_3$ .** На відміну від високої мінливості  $O_3$  як забруднюючої речовини у нижній тропосфері, озоновий шар характеризується значно одноріднішим просторовим розподілом. У масштабах території України просторові відмінності середнього багаторічного розподілу  $O_3$  вкрай малі. На *рис. 1* зображені середні багаторічні вертикальні профілі  $O_3$  над різними локаціями території України. Головною особливістю є подібність профілів, де лише південні регіони характеризуються вищими значеннями на висотах формування максимуму  $O_3$  (що видно по розподілу над Одесою на *рис. 1*). За даними реаналізу EAC4, найвищі концентрації спостерігаються у шарі від 20 гПа до 10 гПа, що відповідає висоті 26–30 км.



**Рис. 1.** Середні багаторічні вертикальні профілі концентрації  $O_3$  над обраними локаціями (для наочності тиск подано в логарифмічній шкалі  $\log_{10}$ )

Враховуючи модельний розрахунок, така висота ймовірно є завищеною, так як результати спостережень на станції Київ-Голосіїв (Andrienko et al., 2021) та відновлені вертикальні профілі за даними супутникових спостережень (див. рис. A1-A2 у Додатку А) для території України вказують на максимальний вміст  $O_3$  на рівні 20–25 км та 23–26 км відповідно. Незважаючи на те, що похибка визначення вертикальних профілів  $O_3$  досить значна для усіх існуючих методів. Так, для методів модельного відновлення похибка зростає з висотою і досягає 10% на висоті 30 км (Zou et al., 2024), тоді як наземні спостереження спектрофотометром Добсона характеризуються загальною неточністю у 5–10% (Petrovavlovskikh et al., 2022). Проте, наявність цих похибок не пояснює систематично завищений максимум у вертикальному профілі  $O_3$  за даними EAC4, тоді як між собою дані наземних та супутникових спостережень узгоджуються значно краще. Більш того, за рахунок циркуляційних процесів зимового сезону північної півкулі, у помірних широтах часто спостерігаються затоки повітря збагаченого  $O_3$  з півночі (Уманець та ін., 2024), де максимуми розташовані значно нижче. Перемішуючись із повітрям помірних широт, у нижній стратосфері можуть формуватися два максимуми  $O_3$  у вертикальному профілі, або формувати значно більший за товщиною шар із високими концентраціями. Така адвекція є короткостроковою, проте її часта повторюваність мала б відобразитися на формуванні максимумів  $O_3$  над територією України на кілька кілометрів нижче. Проте, модельний розрахунок реаналізу EAC4 може не вловлювати подібні процеси настільки детально, а тому середні багаторічні рівні сформовані чітко вище рівня 20 гПа, що можна вважати завищеними відносно реальних висот.

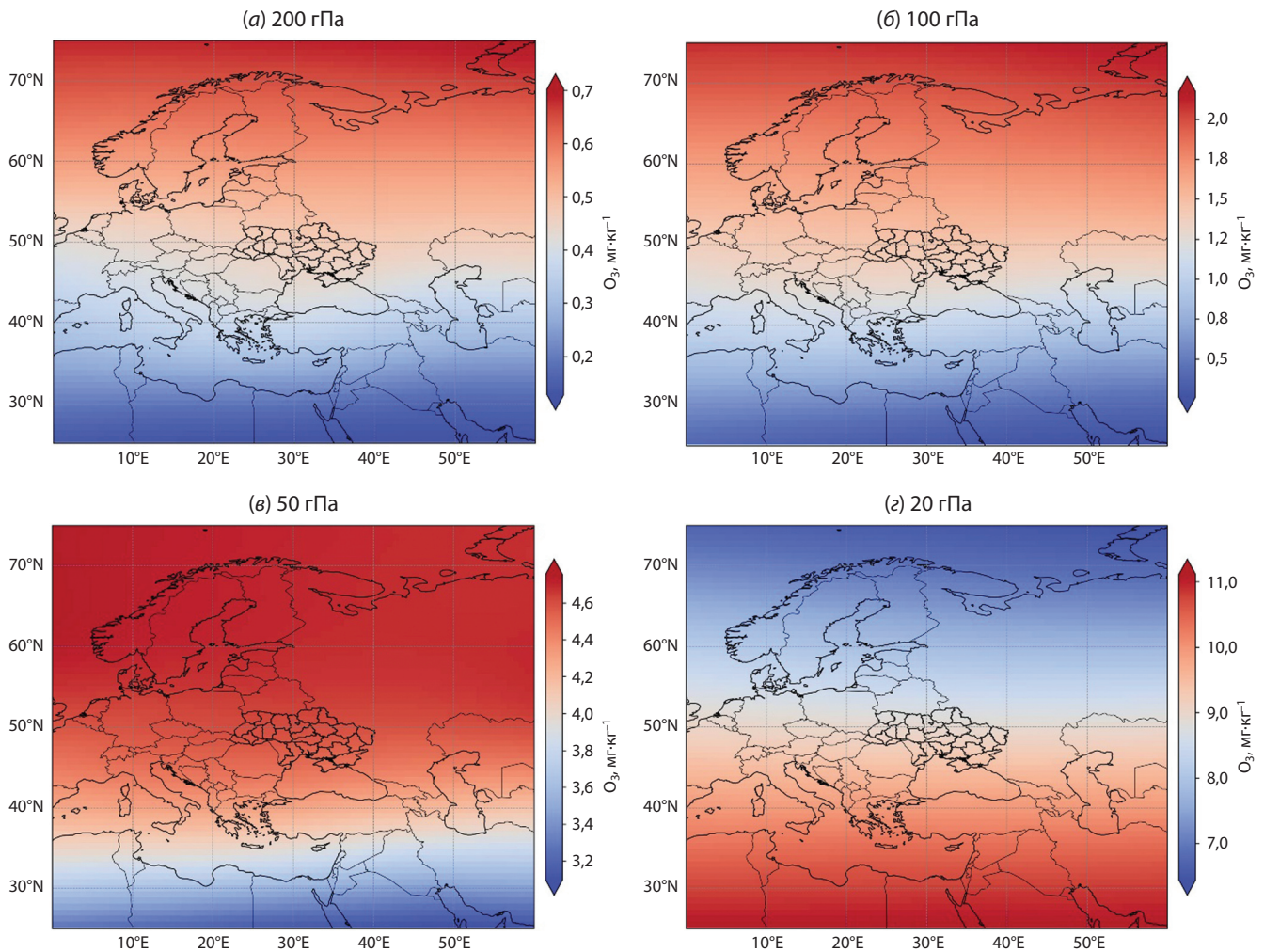
У вертикальному профілі середній багаторічний максимум  $O_3$  складає 12 мг/кг (рис. 1), різко зменшуючись до 4 мг/кг до рівнів 5 гПа (приблизно 35 км) та 50 гПа (приблизно 20 км). Будучи залеж-

ним від тропопаузи, яка перешкоджає вільному обміну повітря тропосфери й стратосфери, вертикальні профілі  $O_3$  чітко вказують на цю межу в атмосфері. У верхній тропосфері  $O_3$  повільно зростає від 1 мг/кг на рівні 200 гПа (приблизно 12 км) до 2 мг/кг на рівні 100 гПа (приблизно 16,5 км). Над тропопаузою у нижній стратосфері градієнт зростання концентрацій  $O_3$  складає приблизно 1 мг/кг на кожен кілометр висоти. Тобто у порівнянні з верхньою тропосферою зростання концентрацій  $O_3$  з висотою відбувається у 3–4 рази швидше.

Концентрації  $O_3$  характеризуються чіткою широтною залежністю на усіх досліджуваних рівнях, проте відрізняються просторовим розподілом на різних висотах. Як наслідок, вище та нижче 25 гПа просторові мінімуми і максимуми  $O_3$  у помірних широтах розташовані протилежно один до одного (див. рис. 2). Першочерговим чинником формування  $O_3$  є фотохімічні реакції, що супроводжуються руйнуванням молекули кисню ( $O_2$ ) на два атоми ( $O+O$ ) під дією сонячного випромінювання із подальшим приєднанням атомарного кисню до іншої молекули  $O_2$ . Відповідно найінтенсивніше ці реакції відбуваються у низьких широтах. Це й зумовлює чітке широтне зменшення концентрацій  $O_3$  у північній півкулі у напрямку із півдня на північ (рис. 2г). Це спостерігається на висотах із максимумом вмісту  $O_3$ , зокрема на рівні 20 гПа (приблизно 26 км) середні багаторічні значення зменшуються із 11 мг/кг у тропіках до 7 мг/кг у високих широтах. На таких висотах має місце фотохімічна рівновага, а динамічний фактор впливає значно менше.

Натомість, у стратосфері нижче рівня 30 гПа за рахунок дії динамічного фактору просторовий розподіл  $O_3$  набуває зворотної залежності (див. рис. 2а–в). За допомогою циркуляції Брюера–Добсона  $O_3$ , продовжуючи активно утворюватися у тропічних широтах, транспортується у напрямку полярних широт, де і накопичується. Додатковим чинником виступає також менш інтенсивне фотохімічне руйнування  $O_3$  порівняно із тропічними широтами. Проте, концентрації на цих рівнях менші і над територією України середні багаторічні значення складають приблизно 0,5 мг/кг на рівні 200 гПа, 1,5 мг/кг на рівні 100 гПа та 4.4 мг/кг на рівні 50 гПа (рис. 2).

Сезонні відмінності вертикального профіля  $O_3$  характеризуються однаковими закономірностями для усієї території України (рис. 3). Загалом, для загального вмісту  $O_3$  у вертикальному стовпі спостерігається зростання у другій половині зимового сезону – початку весняного, і зменшення протягом літа–осені (Дворецька та ін., 2021). Проте, сезонна мінливість загального вмісту сформована різними



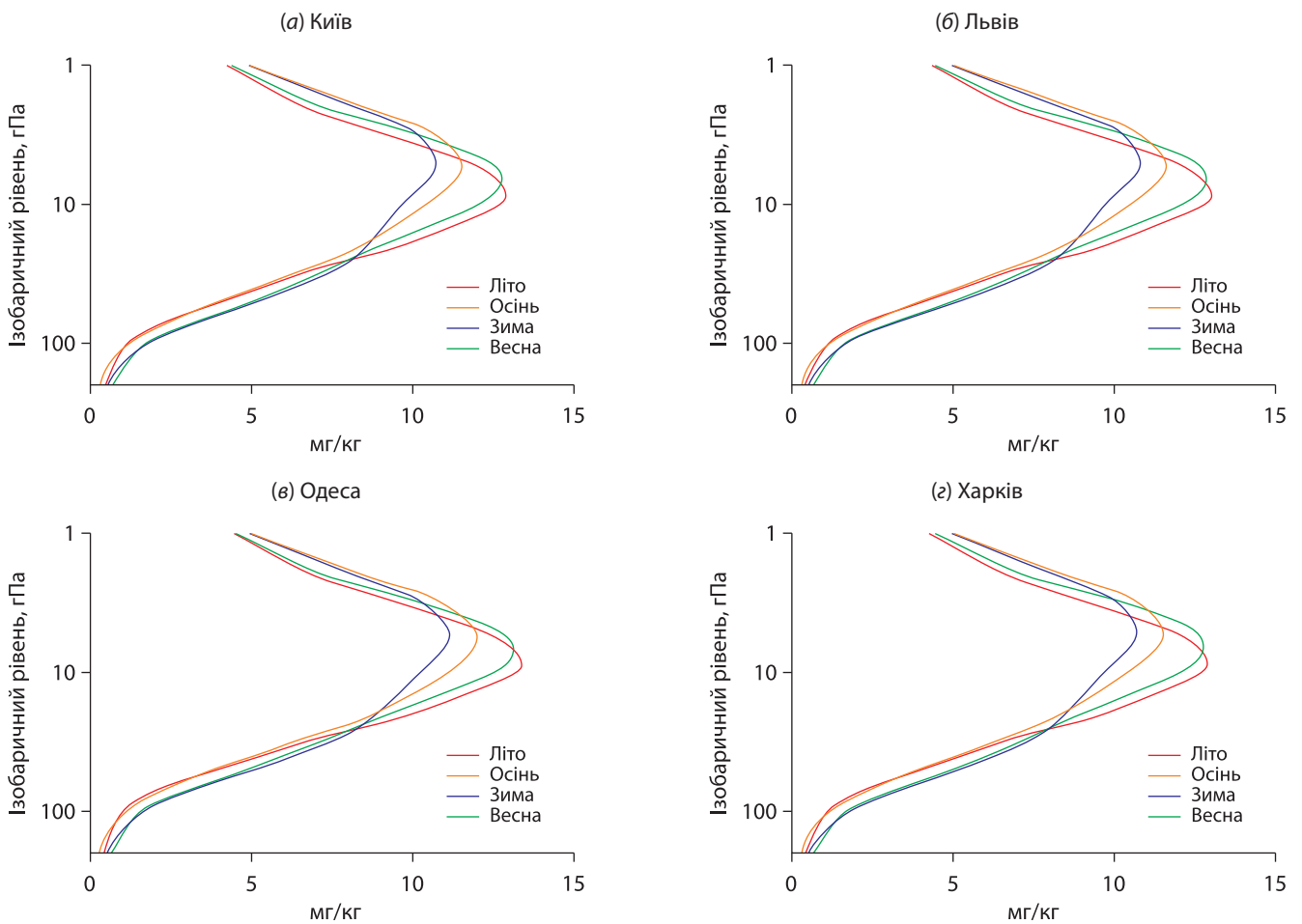
**Рис. 2.** Просторовий розподіл середніх багаторічних концентрацій  $O_3$  над територією України на ізобаричних рівнях 200, 100, 50 та 20 гПа (межі значень на шкалі обрані різними для покращення візуалізації)

закономірностями залежно від висоти. У верхній тропосфері — нижній стратосфері до висот приблизно 30 гПа переважають зимово-весняні максимуми  $O_3$ . Максимуми на цих рівнях пов'язані із динамічним фактором, коли за інтенсивною циркуляцією Брюера–Добсона у зимовий сезон відбувається транспортування  $O_3$  із низьких широт і його накопичення у помірних широтах перед стратосферним циркумполярним вихором. Вище рівня 30 гПа максимальні значення  $O_3$  спостерігаються влітку, що пов'язано із активним фотохімічним утворенням, і мінімальною роллю динамічного фактора на цих висотах протягом року. Саме накопичена різниця у надлишку і дефіциті  $O_3$  на різних висотах визначають сезонну мінливість загального вмісту  $O_3$ , що фіксується супутниковими або наземними спостереженнями.

**2. Багаторічні тенденції змін вертикальних профілів  $O_3$ .** Враховуючи роль озонового шару у фільтруванні шкідливого УФ-опромінення, зміни

його загального вмісту та вертикального розподілу відіграють важливу роль у повторюваності високих значень УФ-індексу та ризиків для здоров'я населення. Для оцінювання змін, що відбулися в озоновому шарі проаналізовано тренди як для усього досліджуваного періоду (рис. 4), так і окремих його сезонів (рис. 5). Статистично значущі тренди на рис. 4 і рис. 5 позначені великими маркерами.

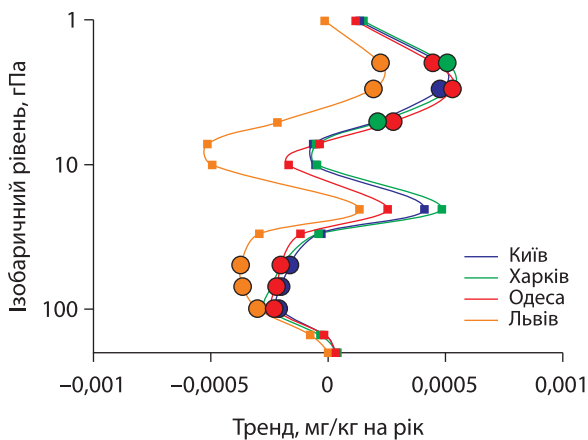
За загальний період над територією України спостерігається зменшення  $O_3$  у шарі 50–100 гПа (16–20 км), та зростання концентрацій вище ізобаричного рівня 10 гПа (вище 30 км) (рис. 4). При цьому над західними районами території України зменшення є більш інтенсивним (див. приклад Львова на рис. 4). Враховуючи точність реаналізу для  $O_3$ , що складає 6–9% (Park et al., 2020), наявні регіональні відмінності між значущими трендами є незначні. Проте, з урахуванням визначення тенденцій на основі багаторічних рядів даних, регіональна відмінність може мати місце і свідчити про перероз-



**Рис. 3.** Середні багаторічні вертикальні профілі концентрації  $O_3$  для різних сезонів над обраними локаціями (для наочності тиск подано в логарифмічній шкалі  $\log_{10}$ )

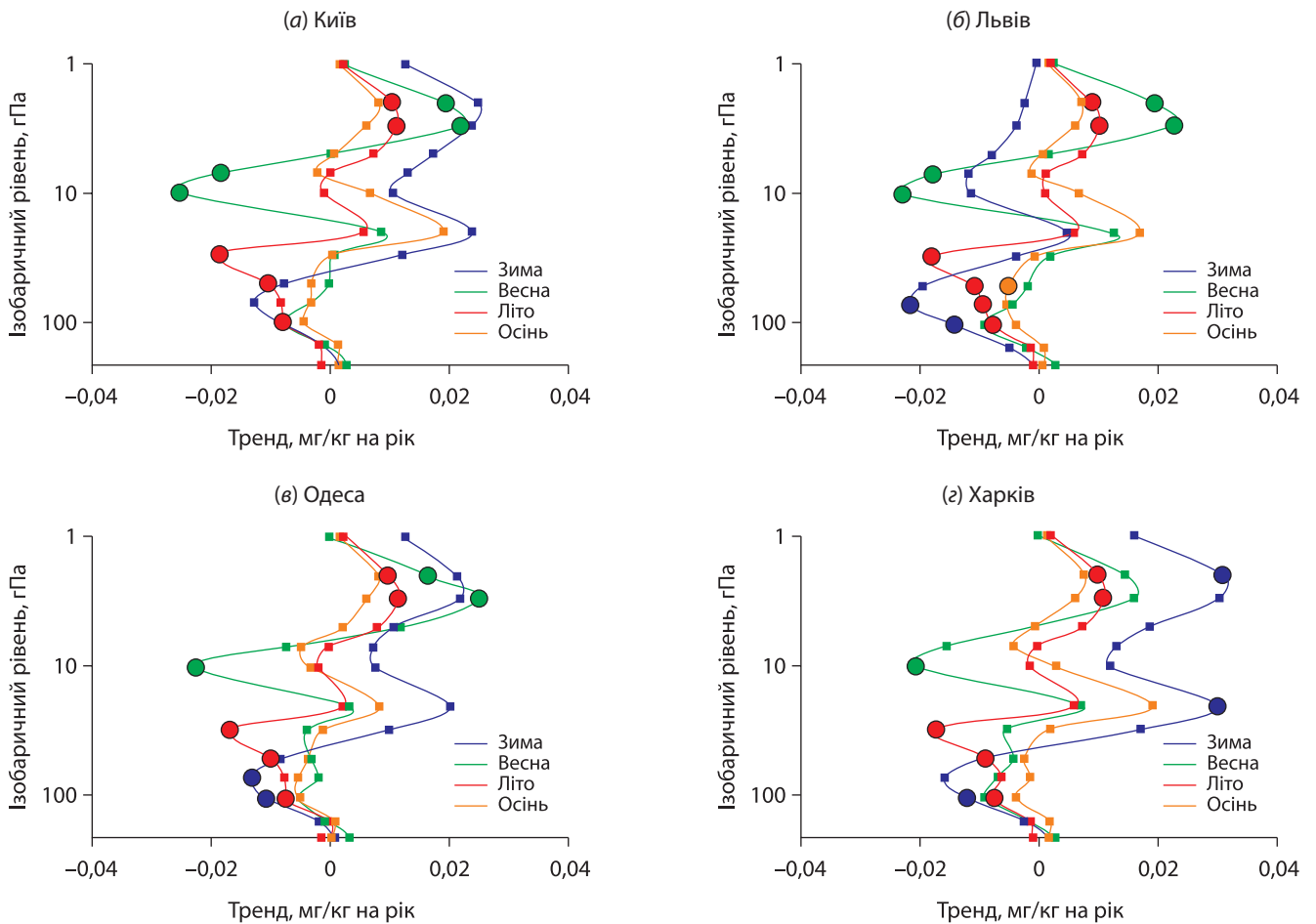
поділ  $O_3$  у вертикальному профілі, що є реакцією на основні фактори формування озонового шару.

Зменшення  $O_3$  на рівнях 50–100 гПа може бути наслідком як динамічного, так і фотохімічного чин-



**Рис. 4.** Вертикальний розподіл лінійних трендів концентрації  $O_3$  над обраними локаціями. Статистично значущі тренди позначені великими маркерами (для наочності тиск подано в логарифмічній шкалі  $\log_{10}$ )

ників. Циркуляція Брюера–Добсона за модельними результатами переважно пришвидшується (Kracher et al., 2016), хоча припускаються і зворотні тенденції (Polvani et al., 2017). Проте цього недостатньо, щоб стверджувати про можливе послаблення циркуляції Брюера-Добсона з менш інтенсивним надходженням  $O_3$  із низьких широт. У зв'язку зі зміною клімату спостерігається зростання висоти тропопаузи (Ladstädter et al., 2025), що у помірних широтах може бути причиною зменшення  $O_3$  на рівнях 50–100 гПа через витіснення стратосферного повітря вгору. Більш того, зменшення  $O_3$  на цих рівнях відбувається і за рахунок хімічних реакцій руйнування із азотовмісними сполуками. Як показано в Galytska et al. (2019), подібні процеси спостерігаються у тропічних широтах і пов'язані зі зростанням концентрацій  $NO_2$ . Натомість значущі тренди до зростання  $O_3$  вище 30 км над територією України можуть бути пов'язані тільки із фотохімічним чинником через незначну роль динамічних факторів на цих рівнях. Виявлення реальних причин зростання  $O_3$  вище 30 км у помірних широтах та хімічних складових,



**Рис. 5.** Вертикальний розподіл лінійних трендів концентрації  $O_3$  для різних сезонів над обраними локаціями. Статистично значущі тренди позначені великими маркерами (для наочності тиск подано в логарифмічній шкалі  $\log_{10}$ )

що беруть при цьому участь, потребує окремих досліджень із залученням моделювання.

Перевірка середніх місячних вертикальних профілів за досліджуваний період показав, що форма вертикального розподілу, наявність мінімумів та максимумів вмісту завжди залишаються незмінні впродовж 2003–2023 рр. Тобто, тренди сформовані змодельованими змінами концентрацій  $O_3$ , а не похибками модельного розрахунку вертикального розподілу у реаналізі ЕАС4. Проте, відкритим залишається питання щодо відображення таких тенденцій з огляду на типове завищення максимумів  $O_3$  реаналізом. З однієї сторони ці тренди можуть відображати тенденції на певних рівнях в атмосфері, а з іншої сторони — тенденції на висотах, що відповідають визначеним концентраціям  $O_3$ . Так, наприклад, за даними реаналізу ЕАС4 неможливо зробити висновок, чи зростання на рівні близько 10 гПа відображає реальні зміни на цих висотах, чи є тенденцією до зростання місця максимальних концентрацій, які у реальній атмосфері розташовані дещо нижче.

Тренди, виявлені за загальний досліджуваний період сформовані переважно інтенсивними змінами у певні сезони (рис. 5). Зміни  $O_3$  літнього сезону найбільш інтенсивно проявляються на рівнях 30–100 гПа і зменшується у цьому шарі з інтенсивністю від  $-0,0005$  мг/кг за рік на рівні 100 гПа до  $-0,02$  мг/кг за рік на рівні 30 гПа. У шарі 5–10 гПа у літній сезон над усією територією України спостерігається зростання  $O_3$  зі значеннями приблизно  $0,01$  мг/кг за рік. Саме літні тренди (рис. 5) багато у чому визначили тенденції загального періоду (рис. 4). Це підтверджує припущення про ключову роль фотохімічних реакцій утворення й руйнування  $O_3$  у формуванні міжрічних тенденцій, адже динамічний фактор влітку у помірних широтах північної півкулі майже не визначає особливості просторового розподілу  $O_3$ .

Подібні тенденції до літніх значень спостерігалися і у зимовий сезон в усіх районах території України за винятком півночі (див. на прикладі Києва на рис. 5) зі значеннями до  $-0,02$  мг/кг за рік у шарі 80–100 гПа. Лише на сході території України

навні значущі тренди на ізобаричних рівнях вище 30 гПа, що досягли максимальних значень приблизно 0,035 мг/кг за рік. Саме зимові тенденції і їх значущість за винятком півночі території України можуть бути єдиними, що сформувалися внаслідок зменшення інтенсивності циркуляції Брюера-Добсона та транспортування  $O_3$  на нижніх рівнях стратосфери.

У перехідні сезони значущі тенденції  $O_3$  виявлено лише на рівнях вище 20 гПа (приблизно 26 км) у весняний сезон. Характерною особливістю весняного сезону є поява від'ємних тенденцій у шарі вище 20 гПа (26 км), але нижче 10 гПа (30 км) зі значеннями до  $-0,025$  мг/кг за рік. Додатні значущі тренди у весняний сезон відсутні над східними районами території України.

Отримані результати показали, що для території України вертикальний та горизонтальний розподіл  $O_3$  у верхній тропосфері — нижній стратосфері можна вважати детермінованим, що підпадає під сезонні варіації озонового шару та зональність розподілу концентрацій. У той же час на міжрічному часовому проміжку мінливість  $O_3$  набуває менш однорідних змін, із відмінними тенденціями на різних вертикальних рівнях та просторовими відмінностями їх прояву в масштабах території України.

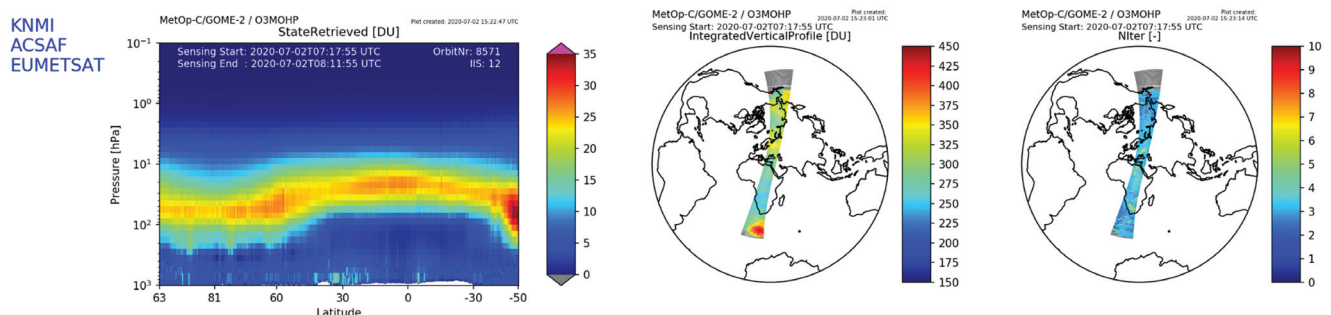
Дослідження просторових відмінностей у тенденціях концентрацій  $O_3$  на регіональному масштабі потребують спеціалізованих досліджень із застосуванням даних озонзондів на території Європи та залучення різноманітних джерел метеорологічної інформації. У випадку підтвердження факту, що в масштабах сотень — тисячі кілометрів в одному широтному поясі спостерігаються різні за інтенсивністю зміни озонового шару (а не відмінності в межах похибок), необхідно врахувати роль струминних течій та зміни стратосферного полярного вихору. Їх довготермінові зміни можуть впливати

на повторюваність затоку повітряних мас із різними концентраціями  $O_3$  та тропосферно-стратосферний обмін.

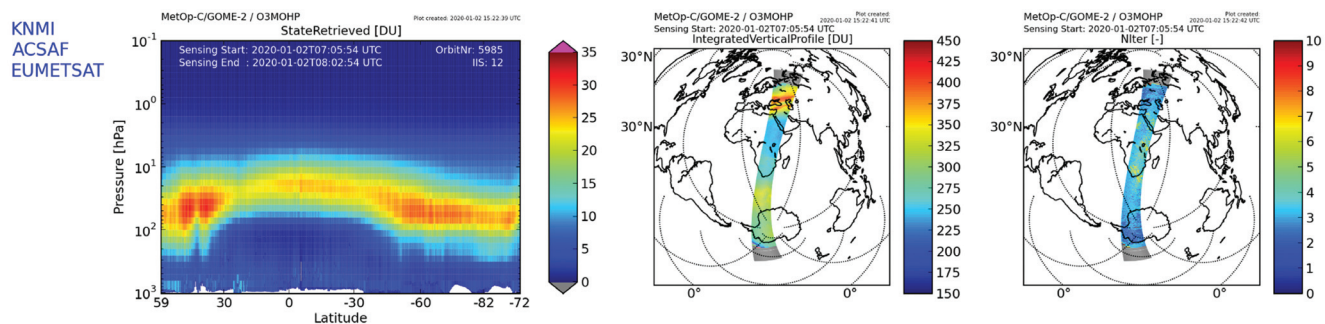
## ВИСНОВКИ

Вертикальний розподіл  $O_3$  над територією України характеризується типовими закономірностями, сформованими динамічним впливом циркуляції Брюера-Добсона у нижчих шарах стратосфери та фотохімічним чинником вище ізобаричного рівня 30 гПа. За даними реаналізу EAC4 максимуми вертикального розподілу виявлені в шарі 20–10 гПа (26–30 км), що може бути дещо вище, ніж реальні максимуми за даними спостережень, які фіксувалися на рівнях від 20 до 26 км. Середні багаторічні максимуми  $O_3$  на цих рівнях досягають 12 мг/кг, зменшуючись до 2 мг/кг у верхній тропосфері. Залежно від сезону, на різних висотах час формування вищих концентрацій відрізняється. Так до висот 30 гПа переважають зимово-весняні максимуми  $O_3$  як наслідок перенесення із циркуляцією Брюера-Добсона, тоді як вище цього рівня мають місце літні максимуми пов'язані із інтенсивнішим фотохімічним утворенням. За досліджуваний період 2003–2023 рр. над територією України спостерігається зменшення концентрацій  $O_3$  в шарі 50–100 гПа (16–20 км) та зростання вище ізобаричного рівня 10 гПа (вище 30 км). Виявлені тенденції переважно сформовані змінами, що відбуваються із озоновим шаром у літній та зимовий сезони. Отримані результати є важливим доповненням до відомих закономірностей розподілу загального вмісту озону над територією України з точки зору визначення причин варіативності озонового шару, що може мати наслідки для повторюваності високих значень притоку шкідливого для здоров'я населення й екосистем УФ-опромінення.

## ДОДАТОК А



**Рис. А1.** Приклад відновленого вертикального розподілу  $O_3$  (зліва), його загальний вміст у вертикальному стовпі (по центру) та кількість ітерацій роботи алгоритму (справа) на основі супутникового зондування MetOp-C/ GOME-2 за 2 січня 2020 року (результати візуалізації із сервісу TEMIS, <https://www.temis.nl/acsaf/index.php>, дата звернення 06.02.2026)



**Рис. А2.** Приклад відновленого вертикального розподілу О<sub>3</sub> (зліва), його загальний вміст у вертикальному стовпі (по центру) та кількість ітерацій роботи алгоритму (справа) на основі супутникового зондування MetOp-C/ GOME-2 за 2 липня 2020 року (результати візуалізації із сервісу TEMIS, <https://www.temis.nl/acsaf/index.php>, дата звернення 06.02.2026)

## ЛІТЕРАТУРА

- Дворецька, І.В. (2012). Особливості динаміки загального вмісту озону в сучасний період. *Наукові праці УкрНДГМІ*, **262**, 257–271.
- Дворецька, І.В., Савенець, М.В., Уманець, А.П. (2021). Оновлені кліматичні норми загального вмісту озону над територією України. *Український гідрометеорологічний журнал*, **28**, 5–15. <https://doi.org/10.31481/uhmj.28.2021.01>
- Грицай, А.В., Міліневський, Г. П. (2018). Загальний вміст озону над станцією Київ-Голосіїв за наземними і супутниковими вимірюваннями у 2010–2015 рр. *Космічна наука і технологія*, **24**(3), 40–54. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.040>
- Могильчак, В.Ю., Міліневський, Г.П. (2017). Варіації загального вмісту озону в атмосфері над територією України. *Космічна наука і технологія*, **23**(2), 41–47. <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.041>
- Уманець А.П., Крайник С.В., Савенець М.В. (2024). Динамічні умови формування просторових екстремумів озонового шару над територією України. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*, **1**(5), 89–99. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2024.05.089>
- Andrienko, Yu., Milinevsky, G., Danylevsky, V. (2021). Vertical ozone profiles in the atmosphere over the Antarctic Peninsula and Kyiv by Umkehr observations. *Ukrainian Antarctic Journal*, **2**, 35–47. <https://doi.org/10.33275/1727-7485.2.2021.676>
- Barnes, P.W., Williamson, C.E., Lucas, R.M., Robinson, S.A., Madronich, S., Paul, N.D., Bornman, J.F., Bais, A.F., Sulzberger, B., Wilson, S.R., Andrady, A.L., McKenzie, R.L., Neale, P.J., Austin, A.T., Bernhard, G.H., Solomon, K.R., Neale, R.E., Young, P.J., Norval, M., Rhodes, L.E., Hylander, S., Rose, K.C., Longstreth, J., Aucamp, P.J., Ballare, C.L., Cory, R.M., Flint, S.D., de Groot, F.R., Hader, D.-P., Heikkilä, A.M., Jansen, M.A.K., Pandey, K.K., Robson, T.M., Sinclair, C.A., Wangberg, S., Worrest, R.C., Yazar, S., Young, A.R., Zepp, R.G. (2019). Ozone depletion, ultraviolet radiation, climate change and prospects for a sustainable future. *Nature Sustainability*, **2**, 569–579. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0314-2>
- Butchart, N. (2014). The Brewer–Dobson circulation. *Reviews of Geophysics*, **52**(2), 157–184. <https://doi.org/10.1002/2013RG000448>
- Cracknell, A.P., Varotsos, C. (2012). Remote Sensing and Atmospheric Ozone. *Springer Berlin Heidelberg*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10334-6>
- Fernandez, R.P., Berná, L., Tomazzoli, O.G., Mahajan, A.S., Li, Q., Kinnison, D.E., Wang, S., Lamarque, J.-F., Tilmes, S., Skov, H., Cuevas, C.A., Saiz-Lopez, A. (2024). Arctic halogens reduce ozone in the northern mid-latitudes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **121**(39). <https://doi.org/10.1073/pnas.2401975121>
- Galytska, E., Rozanov, A., Chipperfield, M.P., Dhomse Sandip, S., Weber, M., Arosio, C., Feng, W., Burrows, J.P. (2019). Dynamically controlled ozone decline in the tropical mid-stratosphere observed by SCIAMACHY. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 767–783. <https://doi.org/10.5194/acp-19-767-2019>
- Hartmann, D. L. (2022). The Antarctic ozone hole and the pattern effect on climate sensitivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119**(35). <https://doi.org/10.1073/pnas.2207889119>
- Hu, D., Shi, S., Wang Z. (2023). Link between Arctic ozone and the stratospheric polar vortex. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **16**(1), 100293. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2022.100293>
- Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J.J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., Suttie, M. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>
- Khanna, S., Shraim, R., Zarkovic, M., van Weele, M., van Geffen, J., Zgaga, L. (2022). Comprehensive Analysis of Seasonal and Geographical variation in UVB radiation relevant for vitamin D production in Europe. *Nutrients*, **14**(23), 5189. <https://doi.org/10.3390/nu14235189>
- Kracher, D., Reick, C.H., Manzini, E., Schultz, M.G., Stein, O. (2016). Climate change reduces warming potential of nitrous oxide by an enhanced Brewer–Dobson circulation. *Geophysical Research Letters*, **43**(11), 5851–5859. <https://doi.org/10.1002/2016GL068390>
- Ladstädter, F., Stocker, M., Scher, S., Steiner, A.K. (2025). Observed changes in the temperature and height of the globally resolved lapse rate tropopause. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **25**, 16053–16062. <https://doi.org/10.5194/acp-25-16053-2025>
- Milinevsky, G., Grytsai, A., Evtushevsky, O., Danylevsky, V., Udodov, E., Gladikov, D. (2013). Vertical ozone distribution features in the atmosphere over midlatitude Kyiv-Goloseyev station. EGU General Assembly 2013, EGU2013-6148. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA.15.6148M/abstract>
- Milinevsky, G.P., Andrienko, Yu., Ivaniha, O., Grytsai, A., Agapitov, O.V., Evtushevsky, O.M., Shi, Y. (2022). Vertical ozone distribution changes by Umkehr measurements, satellite data and MERRA-2 reanalysis over midlatitude station. AGU

- Fall Meeting 2022, A54H-10. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022AGUFM.A54H..10M/abstract>
- Park, S., Son, S.W., Jung, M.I., Park J., Park, S.S. (2020). Evaluation of tropospheric ozone reanalyses with independent ozonesonde observations in East Asia. *Geoscience Letters*, **7**, 12 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40562-020-00161-9>
- Petropavlovskikh, I., Miyagawa, K., McClure-Beegle, A., Johnson, B., Wild, J., Strahan, S., Wargan, K., Querel, R., Flynn, L., Beach, E., Ancellet, G., Godin-Beekmann, S. (2022). Optimized Umkehr profile algorithm for ozone trend analyses. *Atmospheric Measurements Techniques*, **15**, 1849–1870. <https://doi.org/10.5194/amt-15-1849-2022>
- Polvani, L.M., Abalos, M., Garcia, R., Kinnison, D., Randel, W.J. (2017). Significant Weakening of Brewer-Dobson Circulation Trends Over the 21<sup>st</sup> Century as a Consequence of the Montreal Protocol. *Geophysical Research Letters*, **45**(1), 401–409. <https://doi.org/10.1002/2017GL075345>
- Rolf, M. (2009). A brief history of stratospheric ozone research. *Meteorologische Zeitschrift*, **18**(1), 3–24. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/353>
- Roscoe, H. K. (2006). The Brewer–Dobson circulation in the stratosphere and mesosphere — Is there a trend? *Advances in Space Research*, **38**(11), 2446–2451. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.078>
- Shangguan, M., Wang, W., Jin, S. (2019). Variability of temperature and ozone in the upper troposphere and lower stratosphere from multi-satellite observations and reanalysis data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 6659–6679. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6659-2019>
- Shi, Y., Evtushevsky, O., Milinevsky, G., Klekociuk, A., Han, W., Ivaniha, O., Andrienko, Y., Shulga, V., Zhang, C. (2022). Zonal asymmetry of the stratopause in the 2019/2020 arctic winter. *Remote Sensing*, **14**, 1496. <https://doi.org/10.3390/rs14061496>
- Staehelin, J., Petropavlovskikh, I., de Mazière, M., Godin-Beekmann, S. (2018). The role and performance of ground-based networks in tracking the evolution of the ozone layer. *Comptes Rendus. Géoscience*, **350**(7), 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.08.007>
- van Noije, T.P.C., Eskes, H.J., van Weele, M., van Velthoven, P.F.J. (2004). Implications of the enhanced Brewer–Dobson circulation in European centre for medium-range weather forecasts reanalysis ERA-40 for the stratosphere–troposphere exchange of ozone in global chemistry transport models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **109**(D19). <https://doi.org/10.1029/2004JD004586>
- Zou, J., Walker, K.A., Sheese, P.E., Boone, C.D., Stauffer, R.M., Thompson, A.M., Tarasick, D.W. (2024). Validation of ACE-FTS version 5.2 ozone data with ozonesonde measurements. *Atmospheric Measurements Techniques*, **17**, 6983–7005. <https://doi.org/10.5194/amt-17-6983-2024>

## REFERENCES

- Andrienko, Yu., Milinevsky, G., Danylevsky, V. (2021). Vertical ozone profiles in the atmosphere over the Antarctic Peninsula and Kyiv by Umkehr observations. *Ukrainian Antarctic Journal*, **2**, 35–47. <https://doi.org/10.33275/1727-7485.2.2021.676>
- Barnes, P.W., Williamson, C.E., Lucas, R.M., Robinson, S.A., Madronich, S., Paul, N.D., Bornman, J.F., Bais, A.F., Sulzberger, B., Wilson, S.R., Andrady, A.L., McKenzie, R.L., Neale, P.J., Austin, A.T., Bernhard, G.H., Solomon, K.R., Neale, R.E., Young, P.J., Norval, M., Rhodes, L.E., Hylander, S., Rose, K.C., Longstreth, J., Aucamp, P.J., Ballare, C.L., Cory, R.M., Flint, S.D., de Grijijl, F.R., Hader, D.-P., Heikkila, A.M., Jansen, M.A.K., Pandey, K.K., Robson, T.M., Sinclair, C.A., Wangberg, S., Worrest, R.C., Yazar, S., Young, A.R., Zepp, R.G. (2019). Ozone depletion, ultraviolet radiation, climate change and prospects for a sustainable future. *Nature Sustainability*, **2**, 569–579. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0314-2>
- Butchart, N. (2014). The Brewer–Dobson circulation. *Reviews of Geophysics*, **52**(2), 157–184. <https://doi.org/10.1002/2013RG000448>
- Cracknell, A.P., Varotsos, C. (2012). Remote Sensing and Atmospheric Ozone. *Springer Berlin Heidelberg*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10334-6>
- Dvoretzka, I.V. (2012). The features of total ozone dynamics during the modern period. *Naukovi pratsi UkrNDGMI*, **262**, 257–271.
- Dvoretzka, I.V., Savenets, M.V., Umanets, A.P. (2021). Updated total ozone climate normals over the territory of Ukraine. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, **28**, 5–15. <https://doi.org/10.31481/uhmj.28.2021.01>
- Fernandez, R.P., Berná, L., Tomazzeli, O.G., Mahajan, A.S., Li, Q., Kinnison, D.E., Wang, S., Lamarque, J.-F., Tilmes, S., Skov, H., Cuevas, C.A., Saiz-Lopez, A. (2024). Arctic halogens reduce ozone in the northern mid-latitudes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **121**(39). <https://doi.org/10.1073/pnas.2401975121>
- Galytska, E., Rozanov, A., Chipperfield, M.P., Dhomse Sandip, S., Weber, M., Arosio, C., Feng, W., Burrows, J.P. (2019). Dynamical-ly controlled ozone decline in the tropical mid-stratosphere observed by SCIAMACHY. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 767–783. <https://doi.org/10.5194/acp-19-767-2019>
- Grytsai, A.V., Milinevsky, G.P. (2018). Total ozone content over Kyiv-Goloseyev station by ground-based and satellite measurements in 2010–2015. *Space Science and Technology*, **24**(3), 40–54. <https://doi.org/10.15407/knit2018.03.040>
- Hartmann, D. L. (2022). The Antarctic ozone hole and the pattern effect on climate sensitivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119**(35). <https://doi.org/10.1073/pnas.2207889119>
- Hu, D., Shi, S., Wang Z. (2023). Link between Arctic ozone and the stratospheric polar vortex. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **16**(1), 100293. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2022.100293>
- Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J.J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., Suttie, M. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>
- Khanna, T., Shraim, R., Zarkovic, M., van Weele, M., van Geffen, J., Zgaga, L. (2022). Comprehensive analysis of seasonal and geographical variation in UVB radiation relevant for vitamin D production in Europe. *Nutrients*, **14**(23), 5189. <https://doi.org/10.3390/nu14235189>
- Kracher, D., Reick, C.H., Manzini, E., Schultz, M.G., Stein, O. (2016). Climate change reduces warming potential of nitrous oxide by an enhanced Brewer–Dobson circulation. *Geophysical Research Letters*, **43**(11), 5851–5859. <https://doi.org/10.1002/2016GL068390>
- Ladstädter, F., Stocker, M., Scher, S., Steiner, A.K. (2025). Observed changes in the temperature and height of the globally resolved lapse rate tropopause. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **25**, 16053–16062. <https://doi.org/10.5194/acp-25-16053-2025>

- Milinevsky, G., Grytsai, A., Evtushevsky, O., Danylevsky, V., Udodov, E., Gladikov, D. (2013). Vertical ozone distribution features in the atmosphere over midlatitude Kyiv-Goloseyev station. EGU General Assembly 2013, EGU2013-6148. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013EGUGA..15.6148M/abstract>
- Milinevsky, G.P., Andrienko, Yu., Ivaniha, O., Grytsai, A., Agapitov, O.V., Evtushevsky, O.M., Shi, Y. (2022). Vertical ozone distribution changes by Umkehr measurements, satellite data and MERRA-2 reanalysis over midlatitude station. AGU Fall Meeting 2022, A54H-10. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022AGUFM.A54H-10M/abstract>
- Mogylichak, V.Y., Milinevsky, G.P. (2017). Variations of total ozone in the atmosphere over the territory of Ukraine. *Space Science and Technology*, **23**(2), 41–47. <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.041>
- Park, S., Son, S.W., Jung, M.I., Park J., Park, S.S. (2020). Evaluation of tropospheric ozone reanalyses with independent ozonesonde observations in East Asia. *Geoscience Letters*, **7**, 12 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40562-020-00161-9>
- Petropavlovskikh, I., Miyagawa, K., McClure-Beegle, A., Johnson, B., Wild, J., Strahan, S., Wargan, K., Querel, R., Flynn, L., Beach, E., Ancellet, G., Godin-Beekmann, S. (2022). Optimized Umkehr profile algorithm for ozone trend analyses. *Atmospheric Measurements. Techniques*, **15**, 1849–1870. <https://doi.org/10.5194/amt-15-1849-2022>
- Polvani, L.M., Abalos, M., Garcia, R., Kinnison, D., Randel, W.J. (2017). Significant Weakening of Brewer-Dobson Circulation Trends Over the 21st Century as a Consequence of the Montreal Protocol. *Geophysical Research Letters*, **45**(1), 401–409. <https://doi.org/10.1002/2017GL075345>
- Rolf, M. (2009). A brief history of stratospheric ozone research. *Meteorologische Zeitschrift*, **18**(1), 3–24. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/353>
- Roscoe, H. K. (2006). The Brewer–Dobson circulation in the stratosphere and mesosphere — Is there a trend? *Advances in Space Research*, **38**(11), 2446–2451. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.078>
- Shangguan, M., Wang, W., Jin, S. (2019). Variability of temperature and ozone in the upper troposphere and lower stratosphere from multi-satellite observations and reanalysis data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 6659–6679. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6659-2019>
- Shi, Y., Evtushevsky, O., Milinevsky, G., Klekociuk, A., Han, W., Ivaniha, O., Andrienko, Y., Shulga, V., Zhang, C. (2022). Zonal asymmetry of the stratopause in the 2019/2020 arctic winter. *Remote Sensing*, **14**, 1496. <https://doi.org/10.3390/rs14061496>
- Staehelein, J., Petropavlovskikh, I., de Mazière, M., Godin-Beekmann, S. (2018). The role and performance of ground-based networks in tracking the evolution of the ozone layer. *Comptes Rendus. Géoscience*, **350**(7), 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.08.007>
- Umanets A, Krainyk S, Savenets M. (2024). Dynamical conditions of the spatial extremes formation in ozone layer over the territory of Ukraine. *Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring*, **1**(5), 89–99. <http://doi.org/10.15407/Meteorology2024.05.089>
- van Noije, T.P.C., Eskes, H.J., van Weele, M., van Velthoven, P.F.J. (2004). Implications of the enhanced Brewer–Dobson circulation in European centre for medium-range weather forecasts reanalysis ERA-40 for the stratosphere–troposphere exchange of ozone in global chemistry transport models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **109**(D19). <https://doi.org/10.1029/2004JD004586>
- Zou, J., Walker, K.A., Sheese, P.E., Boone, C.D., Stauffer, R.M., Thompson, A.M., Tarasick, D.W. (2024). Validation of ACE-FTS version 5.2 ozone data with ozonesonde measurements. *Atmospheric Measurements. Techniques*, **17**, 6983–7005. <https://doi.org/10.5194/amt-17-6983-2024>

## OZONE VERTICAL DISTRIBUTION IN THE UPPER TROPOSPHERE — LOWER STRATOSPHERE OVER UKRAINE BASED ON THE EAC4 REANALYSIS DATA

**Antonina Umanets**

ORCID: 0009-0008-4867-4430  
umanets@uhmi.org.ua

**Mykhailo Savenets**

ORCID: 0000-0001-9429-6209  
savenets@uhmi.org.ua

Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The paper examines the vertical distribution of O<sub>3</sub> over the territory of Ukraine in the upper troposphere — lower stratosphere layer, its seasonal variability, and interannual trends. The study was conducted using data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Atmospheric Composition Reanalysis 4 (EAC4) for the period 2003–2023. It is shown that the vertical distribution of O<sub>3</sub> below the 30 hPa isobaric level is primarily shaped by the dominant role of the Brewer–Dobson circulation, whereas above this level photo-

chemical reactions become the determining factor. According to EAC4 data, the long-term mean O<sub>3</sub> maxima at these levels reach 12 mg/kg, decreasing to 2 mg/kg in the upper troposphere. The EAC4 reanalysis is shown to overestimate the altitudes at which the maximum O<sub>3</sub> content is observed (10–20 hPa), compared with the mean levels derived from observations (30–50 hPa). Depending on the season, the timing of higher concentrations varies with altitude. Up to the 30 hPa level, winter–spring O<sub>3</sub> maxima prevail as a result of transport by the Brewer–Dobson circulation, whereas above this level, summer maxima occur due to more intensive photochemical production. During the study period, a decrease in O<sub>3</sub> was identified in the 50–100 hPa layer (16–20 km), occurring most intensively in the summer and winter seasons, with a decline rate of 0.02 mg/kg per year. In contrast, above the 10 hPa level (above 30 km), O<sub>3</sub> increases due to interannual changes in the spring season, with an upward trend of approximately 0.03 mg/kg per year. The obtained results provide an important addition to the known patterns of O<sub>3</sub> distribution over Ukraine in terms of identifying the causes of ozone layer variability, which may have implications for the frequency of elevated levels of ultraviolet radiation harmful to human health and ecosystems.

**Keywords:** ozone layer, vertical profile, Brewer-Dobson circulation, variability.

**О.М. Нажмудінова**

ORCID ID: 0000-0002-7988-603X  
olena.nazhmudinova@  
onu.edu.ua

Одеський національний  
університет  
імені І.І. Мечникова,  
Одеса

УДК 551.5, 551.583

DOI:

## СУЧАСНІ УМОВИ ЗВОЛОЖЕННЯ НА ПІВНОЧІ УКРАЇНИ

Збільшення частоти потужних хвиль тепла і посух у європейському регіоні у зв'язку зі змінами клімату виділяють чітку тенденцію до посушливості для Півдня і Сходу України, у північному регіоні на фоні підвищення температури повітря зміни поля опадів мають більш складний характер. У дослідженні використані середні місячні суми опадів для 17 метеостанцій північних областей України (Житомирська, Київська, Чернігівська, Сумська). Виконано порівняльний аналіз показників за два кліматологічних періоди (1961–1990 та 1991–2020 рр.), а також детальний аналіз зміни зволоження в останньому десятиріччі (2011–2020 рр.) з точки зору збільшення аномальності температурно-вологісного режиму в цей період. Зміни середніх місячних сум опадів показують тенденцію до посушливості у квітні, влітку (з максимумом у серпні) та для більшості станцій Півночі країни з листопада до січня (з мінімумом у січні). Місячні суми опадів помітно зросли у травні і жовтні (на Київщині і Чернігівщині подекуди на 20 мм і більше) та для більшості станцій у лютому-березні і вересні. Найбільша неоднорідність у полі опадів відмічається в останньому десятиріччі (2011–2020 рр.). У середньому дефіцит опадів спостерігався на станціях у 43–53% місяців, норма опадів дещо перевищувала частку місяців зі надлишковим зволоженням (за винятком Житомира і Києва). У теплий період року виділяється тенденція до посушливості для всіх 17-ти станцій північного регіону (у 49–61% місяців), а у холодний — переважає нормальний розподіл або перезволоження, за винятком Київщини, де зберігається посушливість за винятком Яготина. Відмічались періоди зі значним перезволоженням (200–400% норми) як у теплий, так і у холодний період, часто вологим був січень-лютий, грудень і жовтень. Розглянуто циркуляційні процеси формування найбільших аномалій у полі опадів. Екстремальні умови зволоження були зумовлені макромасштабними процесами, без виділення регіональних особливостей — стихійні опади у системах південних і західних циклонів і дефіцит опадів при блокувальних процесах як влітку так і взимку.

**Ключові слова:** кліматологічна норма, середня місячна кількість опадів, аномалія, температура повітря, перезволоження, посушливість.

### ВСТУП

Зміни глобального і регіонального клімату демонструють чітку тенденцію до зростання температури повітря в Україні, тоді як поле опадів вирізняється значною мінливістю. Хоча існує прямий вплив глобального потепління на опади, з одного боку, це збільшення посушливості внаслідок нагрівання поверхні і випаровування, з іншого — потепління призводить до посилення конвекції при насиченні вологою й, відповідно, інтенсивних злив, але зв'язки між кількістю опадів і температурою повітря не є однозначними. Значне підвищення температури повітря наразі не супроводжується значним збільшенням кількості опадів по всій території країни. Зростання посушливості внаслідок екстремальних температур може стосуватися лише загальної кількості опадів, а не екстремальних явищ, які є епізодичними і можуть спостерігатися й у посушливі пе-

ріоди в різних регіонах країни. Збільшення частоти та масштабів екстремальних опадів внаслідок антропогенної зміни клімату проявляється, як в останні десятиріччя, так потенційно буде спостерігатися й у майбутньому теплішому європейському кліматі. У роботі (Zatula, 2024) зазначаються несприятливі процеси аридизації клімату на заході, півночі і північному сході країни. Дослідження групи вчених щодо сценаріїв зміни клімату (Polevoy et al., 2024) вказують на те, що розвиток посушливих умов в усіх агрокліматичних зонах очікується вже у першому десятиріччі (2021–2030 рр.) нового кліматологічного періоду. Подальше зростання температури повітря за даними аналізу (Малицька та Балабух, 2020) сприятиме посиленню посушливості.

Більш складною є сезонна зміна кількості опадів. У роботі (Краковська та ін., 2017) для усїєї території країни передбачається трансформація континен-

тального типу розподілу опадів, зокрема збільшення сум опадів у холодний період та їх зменшення у теплий період. Безпосереднім наслідком потепління є збільшення опадів у вигляді дощу замість снігу. Зимі стали теплішими та менш сніжними. Підвищення зимових температур відбувається швидше, ніж влітку, сніговий покрив утворюється рідше, сходить раніше, а випаровуваність і транспірація збільшуються. Зменшення площ снігу також підвищує температуру, що сприяє посушливості. Зокрема, у роботі (Boychenko & Maidanovych, 2024) наголошується на значному зростанні середньої місячної температури з жовтня до березня (0,7–2,0°C за період 1900–2021 рр.), що перевищує показники теплого періоду. Водночас, суми опадів взимку для переважної частини України дещо зросли (Татарчук та Тимофеев, 2015). За висновками (Писаренко та ін., 2019) при зміні характеру опадів (рідше випадають облогові опади, частіше зливові), волога, що надходить на поля за короткий час, фізично не може бути поглинута орним шаром і стікає, збільшуючи ерозію ґрунту.

Зв'язок між аномаліями поля опадів та екстремальними температурами підкреслений у ряді досліджень, де охарактеризовані зміни регіональної великомасштабної циркуляції. Зазвичай мінливість опадів пояснюються активністю циклонів, змінами їхніх траєкторій, частотою блокування тощо (Паламарчук та ін., 2019). За даними (Лялько та ін., 2015) у XXI ст. основною причиною утворення посух в Україні є генерація ядер високого тиску від Арктичного і Азорського центрів дії атмосфери, при цьому наголошується на збільшенні південної складової меридіональної циркуляції. У роботі (Мартазінова та ін., 2022) продемонстровано зменшення кількості опадів у теплий період внаслідок зміщення атмосферної циркуляції на захід у Північній півкулі впродовж останніх десятиліть. Зростає посушливість у квітні, а також на початку осені внаслідок переважного підвищення температури і подовження літнього режиму погоди. Дослідження (Semanova & Vicente-Serrano, 2024) констатує збільшення тривалості та інтенсивності посух теплого сезону та перерозподіл кількості посух між сезонами.

В останні роки зріс відсоток опадів у вигляді інтенсивних півдобових (добових) сум. Зберігається тенденція до стихійних опадів у теплий період року. Однак мінливість інтенсивності опадів у поєднанні зі змінами інтервалу між опадами також можуть призвести до змін загальної кількості опадів. Так, дані (Vyshnevskiy, 2025) вказують на одночасне скорочення тривалості опадів і збільшенні їхньої інтенсивності, клімат стає більш посушливим. У роботі (Кульбіда та ін., 2013) зазначається, що в окремі

роки у теплому періоді відмічалися як вологі, так і посушливі місяці з екстремальною кількістю опадів, але у загальному також підкреслюється тенденція до посушливості впродовж року (період 2002–2011 рр.).

Регіональні зміни полів температури повітря і опадів нині є суттєвими саме на Півночі країни. Зокрема, дослідження температурного режиму Чернігівщини за останній кліматологічний період (Нажмудінова, 2021) показує збільшення повторюваності й тривалості хвиль тепла, посух, додатні аномалії середньої місячної температури реєструвалися впродовж року для всіх метеостанцій. Порівняльний аналіз зміни температури повітря за два кліматологічні періоди (Пясецька та ін., 2022) засвідчує найбільшу зміну середньої місячної температури повітря холодного періоду в січні-березні, при чому найбільше підвищення показників припадає на північно-західні, північні та північно-східні області. Продовження дослідження (Pyasetska & Shcheglov, 2023) має висновки особливо значного підвищення температури у листопаді та на початку зими. Разом з цим, результати аналізу поля опадів північного заходу України (Budnik, 2019) вказують на тенденцію збільшення кількості опадів, але з різною інтенсивністю для станцій, залежно від їхнього розташування. Постає задача узагальнення змін поля опадів для північних областей країни загалом.

**Метою дослідження** є встановлення зміни вологісного режиму на Півночі України у сучасний період в умовах глобального потепління.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Вихідними даними є середня місячна кількість опадів за даними бюлетенів погоди та програми Автоматизоване робоче місце синоптика (АРМ Синоптика) за десятиріччя 2011–2020 рр. для 17 метеорологічних станцій (МС) Півночі України — Житомирської (3), Київської (6), Чернігівської (4) та Сумської (4) областей. Згідно з ДСТУ “Синоптична метеорологія” аномалія метеорологічної величини — це відхилення значень метеорологічної величини від середнього багаторічного її значення. Для аналізу аномалій поля опадів використані кліматологічні стандартні норми 1961–1990 рр. і 1991–2020 рр. Відповідно до термінології прогнозів погоди на місяць, щодо аномалії середньої місячної кількості опадів у роботі прийнято: 80–120% місячної кількості опадів — Н, норма (близько до норми); <80% — менше за норму, П — посушливо; >120% — більше за норму, В — волого. Застосовано прийоми кліматологічного і синоптичного аналізу, порівняльно-описовий метод, просторово-часове узагальнення даних.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Розташування метеостанцій у Житомирській (Житомир, Овруч, Олевськ), Київській (Київ, Біла Церква, Миронівка, Тетерів, Чорнобиль, Яготин), Чернігівській (Чернігів, Ніжин, Прилуки, Семенівка) та Сумській (Суми, Дружба, Конотоп, Ромни) областях має суттєві особливості, і навіть у межах однієї області проявляється вплив місцевих факторів на формування опадів. На початку важливим є виявлення загальної тенденції зміни середніх місячних сум опадів в останньому кліматологічному періоді 1991-2020 рр. по відношенню до попереднього тридцятиріччя. Так, порівняльний аналіз двох послідовних кліматологічних норм не виділяє загальної тенденції до збільшення чи зменшення місячної кількості опадів за період 1991–2020 рр., у тому числі неоднорідність спостерігається як у теплому, так і в холодному періоді року для всіх північних областей (рис. 1).

Однаковий тренд зменшення середньої місячної кількості опадів для усіх 17-ти метеостанцій проявляється у квітні (на 1–9 мм) та значно виразніше у серпні (на 2–23 мм). При цьому, найбільше посушливість у серпні зросла на Чернігівщині та Сумщині — середні показники кількості опадів зменшилися на 10–23 мм: Ромни 23 мм, Суми 20 мм, Семенівка 19 мм. Для Житомирщини та Київщини зменшення середніх сум опадів у серпні неоднорідне: Житомир на 15 мм, а Олевськ лише на 4 мм; Київ 13 мм, Біла Церква 10 мм, а Чорнобиль та Яготин всього на 2 мм. Середні квітневі суми опадів демонструють малий розкид по областях — найбільше зменшилися кількість опадів у Яготині та Олевську — на 9 мм,

Прилуки 8 мм. Далі збільшення посушливості констатується в теплому періоді у червні–липні, відповідно 11 і 13 станцій та у холодному періоді у листопаді (16), грудні (14), січні (9). Таким чином, влітку здебільшого посушливість посилилася (на кількох станціях місячна сума опадів у червні–липні незначно зросла).

Зменшення опадів у листопаді–грудні (1–13 мм) є більш виразним, ніж у січні. Так, у листопаді лише для Миронівки норма залишилася сталою, а у Житомирі кількість опадів зросла на 1 мм, інші станції вказують на зменшення опадів, найбільша від’ємна аномалія у Сумах 13 мм, Ромни 10 мм. У грудні від’ємна аномалія опадів склала 3–12 мм, знову найбільша у Сумах (10 мм) і Ромнах (10 мм), норма опадів збереглася для Чернігова, у Житомирі та Чорнобилі опадів стало дещо більше (на 4 і 1 мм відповідно). Для січня зміни кількості опадів вкрай неоднорідні по областях. Посушливість зросла найбільше у Києві — зменшення опадів на 11 мм, а у Житомирі, Миронівці, Яготині, Семенівці, Дружбі, Конотопі і Ромнах опадів стало більше (на 1-5 мм), для Чорнобиля норма зберігається. На противагу, для всіх 17-ти метеостанцій у травні та жовтні кількість опадів зросла, при цьому найбільше саме у травні (на 2–24 мм). Загалом, більше опадів у травні зареєстровано на Чернігівщині та Київщині, зокрема, Ніжин — збільшення на 24 мм, Яготин на 21 мм. Для жовтня додатна аномалія опадів дещо менша і складає 7–14 мм: Дружба 14 мм, Миронівка та Чернігів 13 мм. У річному розподіл ще у трьох місяцях простежується переважно збільшення середньої місячної суми опадів — лютий–березень та вересень.

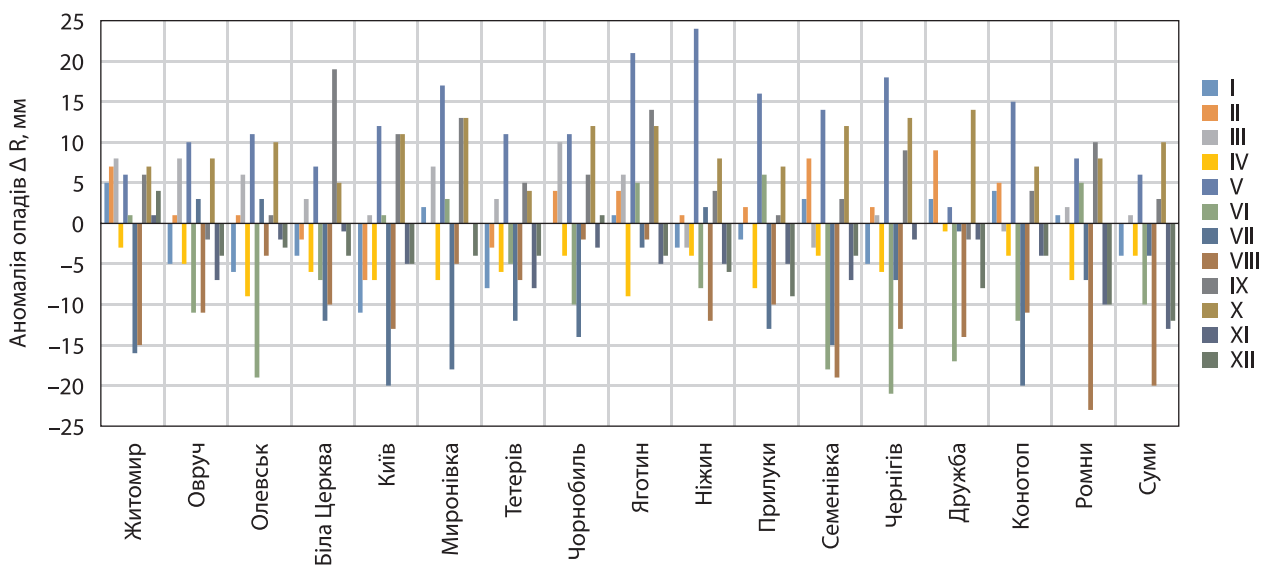


Рис. 1. Відхилення середньої місячної суми опадів кліматологічного періоду 1991–2020 рр. відносно кліматологічного періоду 1961–1990 рр. для Півночі України

сень. Для вересня перевищення норми встановлено для 15 станцій і є вищим (1–19 мм), за винятком Овруча і Дружби, де сума опадів зменшилася на 2 мм. При цьому на Київщині для всіх станцій опадів стало більше, з максимумом у Києві — на 19 мм. У березні додатна аномалія відмічається для 12 станцій — вся Житомирщина і Київщина. У Чернігівській та Сумській області значна неоднорідність зміни опадів: опадів стало трохи більше у Ромнах (2 мм), Чернігові та Сумах (1 мм), Ніжин та Семенівка — зменшення на 3 мм, Конотоп на 1 мм, норма збереглася у Прилуках і Дружбі. Для лютого зростає кількість опадів на Житомирщині та Чернігівщині, з найбільшим показником у Семенівці (8 мм) та Житомирі (7 мм), на Київщині вкрай неоднорідна зміна — Чорнобиль і Яготин додатна аномалія 4 мм, а Біла Церква, Київ, Тетерів від'ємна аномалія (2–7 мм). Миронівка, Ромни і Суми зберегли норму опадів, а Дружба та Конотоп показали збільшення кількості опадів на 9 і 5 мм відповідно.

У результаті, у теплому і холодному періодах останнього тридцятиріччя немає однозначної тенденції зміни середньої місячної кількості опадів для північних областей країни. У цілому, в 5-ти місяцях норми опадів підвищилися — лютий-березень, травень і вересень-жовтень, найбільше у травні й восени, найменше у лютому; у середньому, опадів стало більше на Чернігівщині та Київщині. Однозначно посушливість зростає влітку, у квітні та листопаді-грудні. У сезонному розподілі знак аномалії у загальному зберігається лише влітку; взимку більш посушливим став січень і грудень, а зволоженням лютий; навесні зростає посушливість у квітні, а березень та травень стали вологіші; восени збільши-

лися суми опадів у вересні-жовтні і зменшилися у листопаді.

Зміни температурно-вологісного режиму періоду 1991–2020 рр. вказують на зростання екстремальних подій саме в останньому десятиріччі — посилені хвилі тепла і сурові посухи, надзвичайні короткочасні зливи, пізні снігопади тощо. Являє інтерес дослідження аномалій поля опадів за даними метеостанцій Півночі країни за період 2011–2020 рр. (використана попередня кліматологічна норма 1961–1990 рр., оскільки десятиріччя входить у розрахунковий новий кліматологічний період).

Загалом за десятиріччя реєструвалися періоди як надмірного зволоження з сумами опадів за місяць  $\geq 200$ –300% (часом  $\geq 400\%$ ) від кліматологічної норми, що охоплювали усі станції північного регіону, як то березень 2013 і 2018 рр., вересень 2013 р., травень 2016 і 2020 рр., жовтень 2016 і 2017 рр., грудень 2017 р., так і екстремально посушливі умови для всіх 4-х областей із середньою місячною сумою опадів  $\leq 20\%$  від норми (напр. серпень 2015 р.). У ряді в загальному посушливих місяців теплому періоду розподіл по станціях у межах однієї області неоднорідний, часом кілька станцій демонструють норму опадів або навіть перезволоження, що вказує на частку посиленних конвективних опадів. Із року в рік умови зволоження Півночі країни вкрай мінливі як посезонно, так і у місячному розподілі. Проте, у середньому за десятиріччя зберігається посушливість для усіх 17-ти метеостанцій у 43–53% місяців, найвища у Києві та Прилуках (рис. 2). При цьому частка посушливих місяців досить однорідна для всіх 4-х областей (у середньому 48–49%).

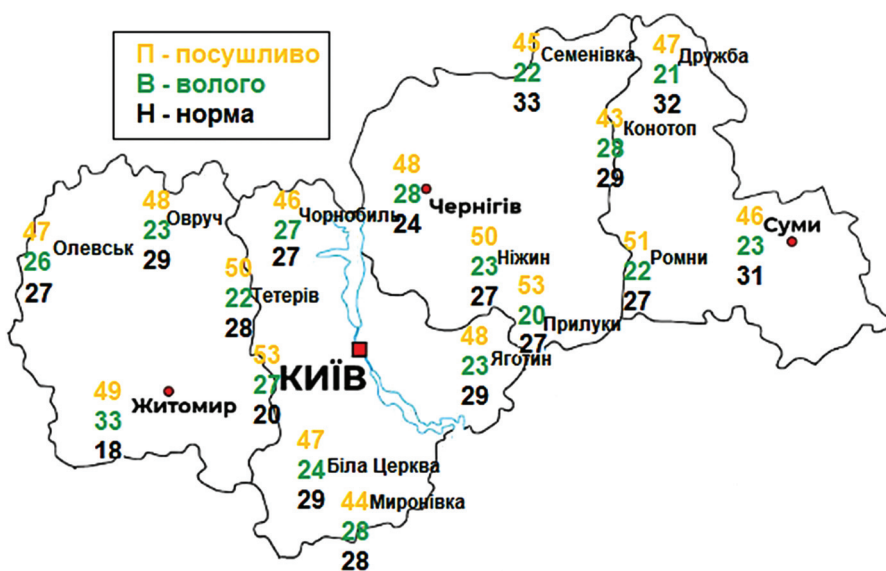


Рис. 2. Повторюваність посушливих (П), вологих (В) та місяців з вологістю, близькою до норми (Н) у північному регіоні України за період 2011–2020 рр. (%)

Зволоження, близьке до норми, у середньому дещо перевершує частку вологих місяців, — це повністю Сумщина (27–32% усіх місяців), та інші 3 області за винятком обласних центрів, де переважали вологі місяці з найбільшою різницею у Житомирі — 33% вологих місяців проти 18% місяців із нормою опадів. Таким чином, не зважаючи на вплив різних місцевих умов для метеостанцій областей, подібність зволоження за десятиріччя у середньому збігається, а отже має місце вплив великомасштабних перетворень і змін клімату з виділенням загальної компоненти.

Відмінності зволоження у теплий та холодний період досить виразні. Так, недобір опадів переважає для всіх станцій у теплому періоді (з квітня до жовтня) — 49–61% місяців (рис. 3). Найбільша частка посушливих місяців на Житомирщині, у середньому 59%, найменша на Сумщині — 54%. За станціями виокремлюється збільшеною повторюваністю посушливих місяців Житомир і Прилуки — по 61%, Ромни 60% (відповідно 43 і 42 місяці з 70). Дещо менше половини місяців теплового періоду (49%) посушливість реєструвалася у Сумах і Миронівці. Поділ між місяцями зі зволоженням, близьким до норми і перезволоженням у теплий період року вказує на деяку перевагу вологих місяців на Житомирщині — у середньому 24% проти 18%, Чернігівщині 26% проти 19%, Київщині, за винятком МС Біла Церква (23% вологих проти 27% місяців з нормою опадів). Для Сумщини розподіл місячних сум опадів по станціях виявився інакшим — переважання місяців із нормою опадів над вологими. Так, для Сум 31% проти 20%, Конотоп 30% проти

19%, Дружба 23% проти 20% вологих місяців; лише у Ромнах вологі місяці мали вищу частку 23% проти місяців із нормою опадів 17%.

Місячний розподіл зволоження у теплому періоді виділяє перевагу посушливості у серпні для 7 метеостанцій, вересні — для 5, квітні — 3, і червні — 2 метеостанцій. Серед вологих місяців виокремлюється жовтень для 12 станцій та рідше травень. Норма опадів частіше реєструвалася у червні (5 станцій), вересні (6), липні (5).

Інакший розподіл зволоження простежується у холодному періоді (листопад–березень) (рис. 4). Посушливість зберігається загалом лише для Київщини 36–46% місяців, за винятком Яготина, де у 44% місяців спостерігається нормальне зволоження та Чорнобиля, де частка посушливих місяців та з нормою опадів рівнозначна (36%). Найчастіше недобір опадів відмічався у Києві. Також виокремлюються Чернігів та Суми — по 42% посушливих місяців. Інші станції вказують на нормальний розподіл опадів або перезволоження, з них на 7 станціях зберігається норма опадів у 36–48% місяців, Прилуки виділяють рівну частку нормального зволоження і посушливості (40%). Найчастіше норма опадів реєструвалася у Семенівці (48%), найрідше — у Житомирі (26%). Житомир і Конотоп показують перевагу вологих місяців — по 42%. Найрідше перезволоження відмічалася у Семенівці та Ніжині, відповідно 16 і 18% (8–9 місяців).

Режим опадів холодного періоду суттєво неоднорідний по місяцях. У загальному в січні за 10 років 13 станцій мають перевагу нормального зволоження; виділяється Конотоп зі значним домінуванням

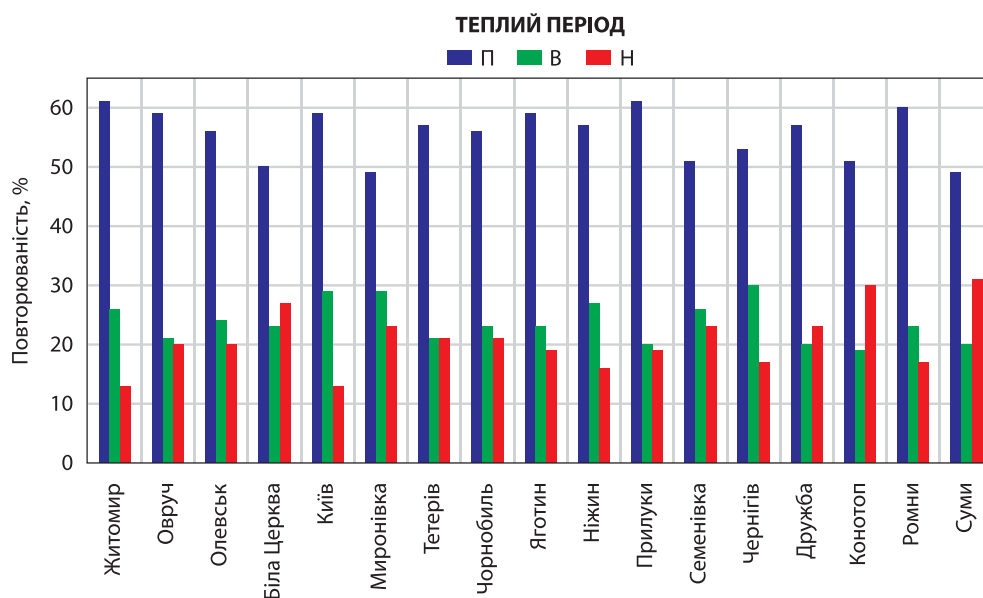


Рис. 3. Повторюваність посушливих (П), вологих (В) та місяців з вологістю, близькою до норми (Н) на Півночі України у теплий період 2011–2020 рр., (%)

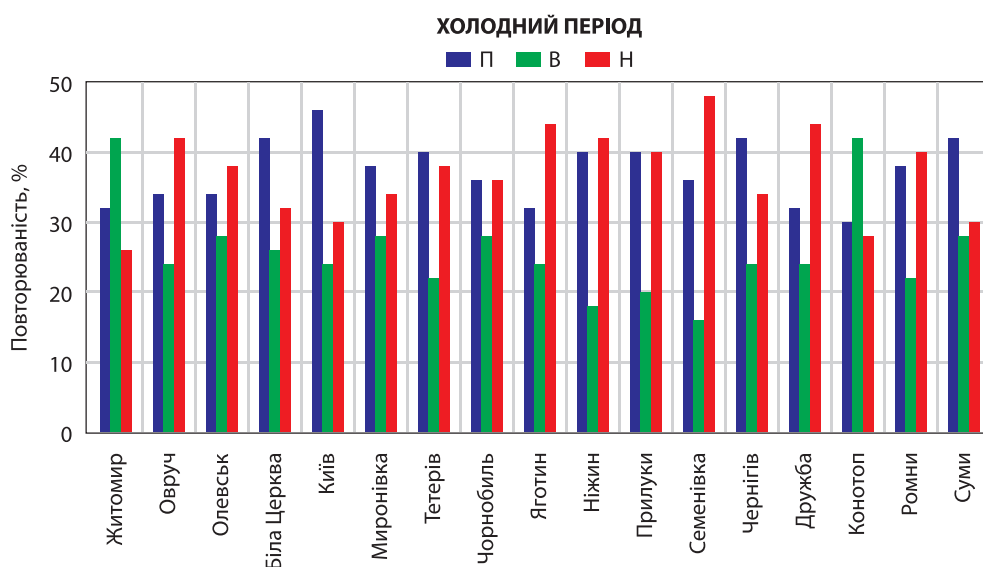
вологого січня (7 років). Лютий і грудень позначають надлишок опадів для 8-9 станцій. Розподіл опадів у березні та листопаді протилежний — у березні для 8 станцій зберігається посушливість (у 4–6 роках), а у листопадів аж для 12 (у 5–7 роках).

Аналіз циркуляційних умов перезволоження виокремлює у теплий період, особливо влітку, панівну частку конвективних опадів, для яких характерна плямистість і неоднорідність по території, в результаті за окремий дощ випадає місячна і більше сума опадів (Паламарчук та ін, 2019). Переміщення фронтальних систем, особливо навесні та восени, спричиняє як значні кумулятивні суми, так і посилені опади за одну чи кілька послідовних діб. Наприклад, у Прилуках в загальному посушливому червні 2015 р. 26–27 числа випало 105 мм опадів; Житомир 12.09.2013 та Ромни 29.06.2016 по 71 мм за добу. Аномально теплі періоди взимку часто формуються за стійкого зонального перенесення і вологі атлантичні повітряні маси зумовлюють значну кількість опадів на Сході Європи.

Найбільша додатна аномалія опадів (163–457% від норми) припала на вересень 2013 року (єдиний вологий вересень десятиріччя) за зниженого температурного режиму. Так, у Києві випало 201 мм опадів (457% норми), Біла Церква 158 мм (451%), Житомир 204 мм (400%), Прилуки 168 мм (342%), Ромни 153 мм (347%) тощо. Це кумулятивні суми фронтальних опадів за місяць із кількох вологих періодів при зміщенні західних і північних циклонів. Показові періоди перезволоження для всього регіону були зумовлені виходом південних циклонів у березні 2013 і 2018 рр., грудні 2012 і 2017 рр.

та жовтні 2016 р. Серія південних циклонів у другій половині березня 2013 р. призвела до відновлення аномально пізнього і високого снігового покриву практично по всій території України. Для північних областей середня місячна норма опадів перевищила норму від 158% (Семенівка) до 373% (Житомир). На 24 число висота снігового покриву в Ромнах складала 57 см, Києві 56 см, Дружбі 47 см зі збереженням до кінця місяця. У березні 2018 р. перевищення середньої місячної норми опадів склало від 124% у Семенівці до 271% у Миронівці. Вихід південного циклону на початку місяця та переміщення фронтальних розділів у другій декаді спричинили високий рівень снігового покриву на Чернігівщині і Сумщині. 4 березня 2018 р. у Ромнах висота снігу сягала 79 см, Конотопі — 50 см, Дружбі — 46 см. Вихід південних циклонів 5–12 жовтня 2016 р. зумовив стихійні опади на Київщині та Чернігівщині: у Чернобилі за цей період випало 148 мм дощу, загалом за місяць перевищення норми 465% (181 мм); Чернігів — 122 мм, за місяць 367% норми (132 мм). У грудні 2012 р. активна фронтальна діяльність у південному та західному циклонах першої половини місяця обумовила встановлення на Київщині і Житомирщині снігового покриву  $\geq 40$ –50 см. Зміщення кількох південних циклонів у грудні 2017 р. призвело до надмірного зволоження по півночі країни з перевищенням норми опадів удвічі і більше.

Посушливі умови на півночі країни влітку і на початку осені типово формувалися за умов потужних хвиль тепла при блокувальних процесах за типом “диполь” та “омегаподібний гребінь” над Європою



**Рис. 4.** Повторюваність посушливих (П), вологих (В) та місяців з вологістю, близькою до норми (Н) на Півночі України у холодний період 2011–2020 рр. (%)

(2015, 2017–2020). У холодний період року недобір опадів спостерігався як за аномально високого температурного фону при поширенні гребенів із заходу і південного заходу (грудень 2013 і 2015, березень 2014 і 2020, листопад 2019, січень 2020), так і при полярних та ультраполярних процесах (лютий 2013 і 2015, листопад 2014 і 2018, березень 2018). Таким чином, на Півночі країни і посушливі умови, і перезволоження формуються при загальних макромасштабних циркуляційних процесах.

## ВИСНОВКИ

Тенденція підвищення температури повітря за сучасних кліматичних умов зберігається, але зміни поля опадів як для Півночі України зокрема, так і для всієї території країни, не мають прямої залежності зі зміною температури повітря. Якщо для Півдня країни зростання посушливості є більш очевидним, то на півночі зміни поля опадів мають складніший характер, особливо у холодне півріччя.

За результатами порівняння кліматологічних норм 1961–1990 та 1991–2020 рр. для північних областей в останньому тридцятиріччі зросла посушливість влітку, інші сезони вказують на нерівномірні зміни, зокрема лютий–березень, травень та ве-

ресень–жовтень для більшості станцій стали вологіші, а квітень та листопад–січень сухіші.

У останньому десятиріччі 2011–2020 рр. більш чіткий тренд спостерігається у теплий період року при переважному дефіциті опадів на Півночі країни. Циркуляційні умови недобору опадів здебільшого зумовлені блокувальними процесами та хвилями тепла при високих температурах повітря. Холодний період позначає деяку тенденцію до нормального зволоження на Житомирщині та Сумщині, для Чернігівщини та Київщини й у холодне півріччя зберігаються більш посушливі умови. Недобір опадів у холодний період року формувався за додатних аномалій температури у системах висотних гребенів і за від'ємних аномалій температури при, так званих, східних процесах. При цьому для всіх станцій Півночі країни аномально вологими виявилися вересень 2013, березень 2013 і 2018, травень 2016 і 2020, жовтень 2016 і 2017, грудень 2017. Надлишок опадів здебільшого формувався у системах західних і південних циклонів.

Мінливість поля опадів є значною, дослідження змін зволоження потребує залучення даних про сучасний стан загальної циркуляції атмосфери та довготривалих факторів впливу на клімат і погоду.

## ЛІТЕРАТУРА

- Краковська, С.В., Паламарчук, Л.В., Гнатюк, Н.В., Шпиталь, Т.М., Шедененко, І.П. (2017). Зміни поля опадів в Україні у XXI ст. за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей. *Геоінформатика*, **4**, 62–74. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf\\_2017\\_4\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf_2017_4_9)
- Кульбіда, М.І., Олійник, З.Я., Паламарчук, Л.В., Галицька, Є.І. (2013). Аналіз режиму опадів на території України за десятиріччя 2002–2011 рр. *Фізична географія та геоморфологія*, **1**, 127–138. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/fiz\\_geo\\_2013\\_1\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/fiz_geo_2013_1_17)
- Лялько, В.І., Єлістратова, Л.О., Апостолов, О.А. (2014). Дослідження проблем посушливості на території України з використанням наземної та супутникової інформації. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, **2**, 18–28. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukjdzz\\_2014\\_2\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukjdzz_2014_2_5)
- Малицька, Л.В., Балабух, В.О. (2020). Ймовірні зміни кліматичних умов України до середини XXI ст. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, **1** (56), 94–100. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge\\_2020\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2020_1_12)
- Мартазінова, В.Ф., Городецька, Н.С., Рибченко, Л.С., Савчук, С.В., Гребенюк, Н.П., Татарчук, О.Г. (2022). Особливості температурно-вологісного режиму території України з початку XXI сторіччя під впливом змін великомасштабної атмосферної циркуляції. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*, **2**, 22–34. <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001463853>
- Нажмудінова, О.М. (2021). Зміни температури повітря на Чернігівщині. *Фізична географія та геоморфологія*, **108**, **44** (2), 49–55. <https://doi.org/10.17721/phgg.2021.4-6.05>
- Паламарчук, Л.В., Сокур, К.С., Заблоцька, Т.М. (2019) Динаміка інтенсивності опадів та мезоструктурні особливості їх полів у теплий період року на рівнинній частині території України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, **4** (55), 95–111. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2019.4.8>
- Писаренко, В.М., Писаренко, П.В., Писаренко, В.В., Горб, О.О., Чайка, Т.О. (2019). Посухи в контексті змін клімату України. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, **1**, 134–146. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VPDAA\\_2019\\_1\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VPDAA_2019_1_17)
- Пясецька, С.І., Щеглов, О.А., Гребенюк, Н.П. (2022) Порівняння полів середньої місячної температури повітря протягом кліматичних норм 1991–2020 рр. відносно 1961–1990 рр.: колективна монографія / за ред. М.С. Мальваного. Київ: Ярошенко Я.В., 202–228. <https://doi.org/10.51500/7826-23-0>
- Татарчук, О., Тимофеев, В. (2015). Характеристика найбільшої місячної кількості опадів на території України в умовах сучасного клімату. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Географія)*, **1**(63), 33–37. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU\\_geograf\\_2015\\_1\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU_geograf_2015_1_10)
- Boychenko, S., & Maidanovych, N. (2024). A century-long tendency of change in surface air temperature on the territory of Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, **46** (2). <https://doi.org/10.24028/gj.v46i2.297227>
- Budnik, S.V. (2019). Spatio-Temporal Change of Atmospheric Precipitation on Territory of North-West of Ukraine. *Journal of Atmospheric Science Research*, **2**(4), 1–4. <https://doi.org/10.30564/jas.v2i4.1564>
- Polevoy, A., Barsukova, O., Husieva, K., Zhygailo, O., Volvach, O., Kyrnasivska, N., Tolmachova, A., Zhygailo, T., Danilova, N. & Kostukievych, T. (2024). The Climate Change Impact on the Development of Droughts in Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, **25** (6), 194–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/187276>
- Pyasetska, S., & Shcheglov, O. (2023). The modern nature of changes in the average monthly air temperature during 2006–

2020. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, **58**, 217–230. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-17>
- Semenova, I., & Vicente-Serrano, S. M. (2024). Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine. *International Journal of Climatology*, **44**(6), 1849–1866. <https://doi.org/10.1002/joc.8416>
- Krakovska, S.V., Palamarchuk, L.V., Gnatiuk, N.V., Shpytal, T.M., She-demenko, I.P. (2017). Changes in precipitation distribution in Ukraine for the 21<sup>st</sup> century based on data of regional climate model ensemble. *Geoinformatika*, **4**, 62–74. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf\\_2017\\_4\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf_2017_4_9) [in Ukrainian].
- Kulbida, M., Oliynyk, Z., Palamarchuk, L., Galytska, E. (2013). Precipitation regime in Ukraine for the decade 2002–2011. *Physical Geography and Geomorphology*, **1**, 127–138. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/fiz\\_geo\\_2013\\_1\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/fiz_geo_2013_1_17) [in Ukrainian].
- Lyalko, V.I., Yelistratova, L.A., Apostolov, A.A. (2014). Researches of problems of dryness in the territory of Ukraine with use of land and satellite information. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, **2**, 18–28. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukjdz\\_2014\\_2\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukjdz_2014_2_5) [in Ukrainian].
- Malytska, L.V., Balabukh, V.O. (2020). Possible changes of climate conditions in Ukraine to the middle of the XXI century. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, **1**(56), 94–100. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge\\_2020\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2020_1_12) [in Ukrainian].
- Martazinova, V.F., Horodetska, N.S., Rybchenko, L.S., Savchuk, S.V., Hrebenuk, N.P., Tataruchuk, O.H. (2022). Features of the current state of the temperature-humidity regime of Ukraine since the beginning of the XXI century under the influence of changes of large-scale atmospheric circulation. *Meteorology. Hydrology. Environmental monitoring*, **2**, 22–34. <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001463853> [in Ukrainian].
- Nazhmudinova, H.N. (2021). Anomalies of air temperature in Chernihiv region. *Physical Geography and Geomorphology*, **108**, **44** (2), 49–55. <https://doi.org/10.17721/phgg.2021.4-6.05> [in Ukrainian].
- Palamarchuk, L., Sokur, K., Zabolotska, T. (2019). Dynamics of rainfall intensity and mesostructural characteristics of their fields in the warm period of the year in the plain part of Ukraine. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, **4**(55), 95–111. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2019.4.8>.
- Pysarenko, V.M., Pysarenko, P.V., Pysarenko, V.V., Gorb, O.O., Chaika, T.O. (2019). Droughts in the context of climate changes in Ukraine. *Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy*, **1**, 134–146. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VPDAA\\_2019\\_1\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VPDAA_2019_1_17) [in Ukrainian].
- Vyshnevskiy, V.I. (2025). Climate Change in Ukraine and its Consequences. *Journal of Landscape Ecology*, **18**(4), 150–174. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2025-0032>
- Zatula, V. (2024). Complex assessing of aridity in Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, **61**, 180–192. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-15>
- Pysetska S.I., Shcheglov, O.A., Grebenyuk, N.P. (2022). Space-time distribution of mass deposits of wet snow in the territory of Ukraine during 1991–2020: collective monograph / edited by M.S. Malovany. Kyiv: Yaroshenko Y.V., 202–228. <https://doi.org/10.51500/7826-23-0> [in Ukrainian].
- Tymofeyev, V., Tataruchuk, O. On the monthly maximum precipitation amount in Ukraine in conditions of the current climate. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. (Geography)*, **1**(63), 33–37. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU\\_geograf\\_2015\\_1\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU_geograf_2015_1_10) [in Ukrainian].
- Boychenko, S., & Maidanovych, N. (2024). A century-long tendency of change in surface air temperature on the territory of Ukraine. *Geofizicheskij Zhurnal*, **46**(2). <https://doi.org/10.24028/gj.v46i2.297227>
- Budnik, S.V. (2019). Spatio-Temporal Change of Atmospheric Precipitation on Territory of North-West of Ukraine. *Journal of Atmospheric Science Research*, **2**(4), 1–4. <https://doi.org/10.30564/jasr.v2i4.1564>
- Polevoy, A., Barsukova, O., Husieva, K., Zhygailo, O., Volvach, O., Kyrnasivska, N., Tolmachova, A., Zhygailo, T., Danilova, N. & Kostiukievych, T. (2024). The Climate Change Impact on the Development of Droughts in Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, **25**(6), 194–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/187276>
- Pyasetska, S., & Shcheglov, O. (2023). The modern nature of changes in the average monthly air temperature during 2006–2020. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, **58**, 217–230. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-17>
- Semenova, I., & Vicente-Serrano, S.M. (2024). Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine. *International Journal of Climatology*, **44**(6), 1849–1866. <https://doi.org/10.1002/joc.8416>
- Vyshnevskiy, V.I. (2025). Climate Change in Ukraine and its Consequences. *Journal of Landscape Ecology*, **18**(4), 150–174. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2025-0032>
- Zatula, V. (2024). Complex assessing of aridity in Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, **61**, 180–192. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-15>

## REFERENCES

### MODERN CONDITIONS OF HUMIDIFICATION IN THE NORTH OF UKRAINE

Olena Nazhmudinova

ORCID ID: 0000-0002-7988-603X

olena.nazhmudinova@onu.edu.ua

Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa

*The increase in the frequency of intense heat waves and droughts in the European region due to climate change highlights a clear trend towards aridity for the South and East of Ukraine, while in the northern region, against the backdrop of*

*rising air temperatures, changes in precipitation patterns are of a more complex nature. The study used average monthly precipitation amounts for 17 meteorological stations in the northern regions of Ukraine (Zhytomyr, Kyiv, Chernihiv and Sumy). Conducted a comparative analysis of indicators for two climatological periods (1961–1990 and 1991–2020), as well as a detailed analysis of changes in moisture over the last decade (2011–2020) in terms of increasing anomaly of the temperature-humidity regime during this period. Changes in the average monthly rainfall amounts show a tendency toward dryness in April, in summer (with a maximum in August), and for most stations in the North of the country from November to*

*January (with a minimum in January). Monthly precipitation amounts increased noticeably in May and October (in Kyiv and Chernihiv regions in some places by 20 mm or more) and, for most stations, in February-March and September. The greatest variability in precipitation fields observed in the last decade (2011–2020). On average, a precipitation deficit observed at the stations in 43-53% of the months, while normal precipitation slightly exceeded the share of months with deficient moisture (except for Zhytomyr and Kyiv). During the warm season, there is a tendency toward drought for all 17 stations in the northern region (in 49–61% of months), while in the cold season, normal distribution or excess moisture predominates, except for Kyiv region, where drought persists except for Yahotyn. Periods of sig-*

*nificant excess moisture (200–400% of the norm) were observed in both warm and cold seasons, with January-February, December, and October often being wet. The processes of circulation in the formation of the largest precipitation anomalies have been considered. Extreme humidity conditions were caused by large-scale processes, without taking regional characteristics into account — intense precipitation in southern and western cyclones and a lack of precipitation during blocking processes both in summer and in winter.*

**Keywords:** climatological norm, average monthly precipitation, anomaly, air temperature, overmoistening, aridity.



**П.М. Линник<sup>1</sup>**

ORCID 0000-0002-2144-4052  
peter-linnik@urr.net

**В.А. Жежеря<sup>1,2</sup>**

ORCID 0000-0002-1128-5270  
zhezheryava1981@gmail.com

УДК 556.114:556.5(28)

DOI:

## ВУГЛЕВОДИ ЯК ВАЖЛИВА СКЛАДОВА ПРИРОДНИХ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН У ПОВЕРХНЕВИХ ВОДАХ

*Представлено результати довгострокових досліджень розчинених вуглеводів у різномісних водних об'єктах України (озера, річки та водосховища). Розчинені вуглеводи — друга за поширеністю група природних органічних сполук після гумусових речовин. Їхня концентрація варіює в широких межах, коливаючись від 0,19 до 5,43 мг/дм<sup>3</sup> (у вигляді глюкози), а їхній внесок у загальний баланс карбону розчинених органічних речовин (С<sub>орг</sub>) коливається від 2,2 до 36,1% (в середньому 4,7–16,4% С<sub>орг</sub>). Концентрація вуглеводів залежить значною мірою від типу водойми та її трофічного стану, а також від розвитку фітопланктону та вищої водної рослинності, які є основними джерелами вуглеводів. Максимальні концентрації характерні для невеликих, урбанізованих водойм зі значним антропогенним впливом та високим вмістом біогенних речовин. Більшість із них — високоевтрофні водойми, в яких інтенсивно розвивається фітопланктон та вища водна рослинність. Це основна причина високих концентрацій вуглеводів. Максимальну концентрацію розчинених вуглеводів виявлено в літньо-осінню пору року. За результатами гель-хроматографічних досліджень встановлено, що розчинені вуглеводи представлені сполуками з широким діапазоном молекулярної маси — від <1,0 до >70,0 кДа. Однак у їхньому складі домінують полісахариди, частка яких становить у середньому 67,7–83,7% від загального вмісту розчинених вуглеводів. Найімовірніше, це пов'язано з тим, що в процесі активного вивільнення вуглеводів водоростями переважають сполуки з полімерною структурою. На низькомолекулярні сполуки (<1,0 кДа) припадає 16,3–32,3%. Обговорюються сезонні коливання низькомолекулярної фракції вуглеводів. Зазначається, що найбільша трансформація високомолекулярних фракцій вуглеводів відбувається влітку, коли підвищується температура води та активізуються внутрішньоводоймові процеси, зокрема за участю мікрофлори.*

**Ключові слова:** вуглеводи, моносахариди, полісахариди, розчинені органічні речовини, поверхневі водні об'єкти, урбанізована територія.

### ВСТУП

Розчинені вуглеводи є однією з найпоширеніших груп органічних речовин у поверхневих водних об'єктах після гумусових речовин. Вони синтезуються живими організмами, зокрема вищою водною рослинністю, водоростями, тваринами, бактеріями та грибами, і виділяються у вигляді екзометаболітів у процесі їхньої життєдіяльності. Вуглеводи включають вільні редуковані цукри у вигляді суміші моно-, ди- та трисахаридів і їхніх похідних, а також складні вуглеводи, які включають олігосахариди, полісахариди та вуглеводоподібні сполуки в комплексах з іншими класами органічних речовин (Haiber et al., 2001; Jørgensen, 2009; Koivula and Hänninen, 2001; Linnik and Ivanechko, 2014). Передусім це стосується гумусових речовин, у складі яких вуглеводні фрагменти виявлено переважно у фракціях з молекулярною масою >10 кДа (Haiber et al., 2001). Класи-

фікацію вуглеводів у найбільш спрощеному вигляді наведено на *рис. 1*.

Концентрація розчинених вуглеводів варіює в широкому діапазоні залежно від типу водойми і рівня її евтрофікації. Вміст вільних редукованих цукрів (простих вуглеводів) та складних вуглеводів у річкових водах становить 0,1–0,6 та 0,25–1,0 мг/дм<sup>3</sup> у перерахунку на глюкозу. Концентрація цих двох груп сполук виражається, зазвичай, значеннями одного порядку, а в деяких випадках вільних редукованих цукрів більше, ніж складних вуглеводів. Їхня концентрація у воді водосховищ становить 0,1–0,4 та 0,2–0,3 мг/дм<sup>3</sup> відповідно. Межі можливих коливань концентрації редукованих цукрів (0,08–6,5 мг/дм<sup>3</sup>) та складних вуглеводів (0,14–6,9 мг/дм<sup>3</sup>) у воді озер ширші, ніж у річках і водосховищах (Linnik and Ivanechko, 2014; Osadchyy et al., 2016; Хільчевський, 2022). У деяких випадках, переважно

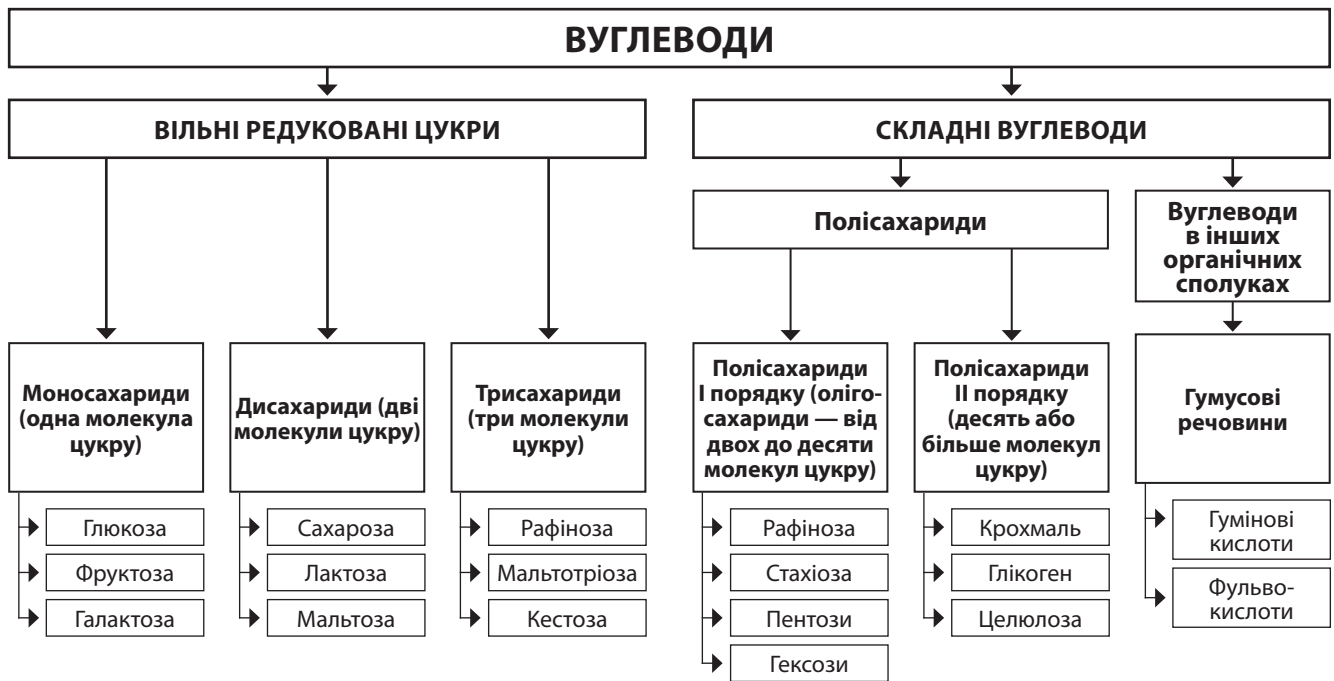


Рис. 1. Класифікація вуглеводів

в озерах з високим трофічним рівнем, вона може зростати до 30 мг/дм<sup>3</sup> (Chróst et al., 1989). Концентрація розчинених вуглеводів у поверхневих водах України становить 0,19–5,43 мг/дм<sup>3</sup> (Linnik and Ivanechko, 2014).

Таким чином, найнижчі концентрації розчинених вуглеводів характерні для водойм із низькою біологічною активністю, зокрема, для високогірних та збагачених гумусовими речовинами озер. Високі концентрації цих природних органічних сполук, проявляються, зазвичай, в евтрофних водоймах із високою продуктивністю водоростей (Jørgensen, 2009). Тому фітопланктон вважається важливим джерелом вуглеводів у прісних водоймах, особливо у високоевтрофних та морських водах. Збільшення інтенсивності розвитку фітопланктону супроводжується зростанням концентрації позаклітинних вуглеводів (Сакевич та Усенко, 2008). Різке збільшення вмісту розчинених вуглеводів у воді — до 11–190 мг/л спостерігалось в місцях скупчення фітопланктону під час “цвітіння” води внаслідок розкладання клітин водоростей. Наприклад, це було характерно для Кременчуцького водосховища (Україна) влітку 1975 року. У цей період у вищезгаданому водосховищі зафіксовано масовий ріст водоростей із помітним накопиченням їхньої біомаси на окремих ділянках. Водночас вважається, що зарості вищої водної рослинності на мілководді — це також значне джерело розчинених вуглеводів.

Частка вуглеводів, за різними оцінками, становить від 5 до 35% від загального вмісту C<sub>орг</sub> (Alberts, 1988; Aquatic ecosystems..., 2003; Gueguen,

2006; Jørgensen, 2009; Khodse et al., 2010; Linnik and Ivanechko, 2014; Pakulski and Benner, 1994; Wang et al., 2013). У високопродуктивних озерах цей показник значно вищий і сягає майже 50% C<sub>орг</sub> (евтрофне озеро Плюзеє (Lake Plußsee) в Німеччині) і навіть 65% C<sub>орг</sub> в евтрофних антарктичних озерах острова Сігні (Jørgensen, 2009). Висока частка розчинених вуглеводів (60–65% C<sub>орг</sub>) характерна для деяких естуаріїв та морських заток (Khodse et al., 2010; Terzić et al., 1998). Частка розчинених вуглеводів у поверхневих водах України знаходиться у межах від 2,2 до 36,1% C<sub>орг</sub>, складаючи у середньому 9,0% C<sub>орг</sub> у загальному балансі розчинених органічних речовин (POP) (Linnik, 2020; Linnik and Ivanechko, 2014). Усереднений внесок розчинених вуглеводів у загальний вміст POP у водосховищах Дніпровського каскаду становить 2,3–10,0% C<sub>орг</sub> (Линник та ін., 2019; Osadchyy et al., 2016).

Як зазначено вище, до вуглеводів належать вільні редуковані цукри, полісахариди, а також вуглеводоподібні речовини (складні сполуки вуглеводів із речовинами інших класів, наприклад, з гумусовими речовинами), нейтральні альдозо, включаючи глюкозу, галактозу, рамнозу, фукозу, ксилозу, манозу, а також уронові кислоти (Biersmith and Benner, 1998; Khodse et al., 2010; Paulsen and Aslaksen, 1998; Sutherland, 2001). Дані не лише про загальний вміст розчинених вуглеводів, але й про їхні складові, включаючи моносахариди та полісахариди, наведено в багатьох наукових публікаціях. Багато з них (Chróst et al., 1989; D’Ayala et al., 2008; Gremm, 1997; Khodse et al., 2010; Striquer-Soares and Chevolut,

1996) свідчать про переважання полісахаридів у складі вуглеводів, оскільки їхня концентрація у 3, а іноді навіть у 6–8 разів вища, ніж моносахаридів. Наприклад, частка розчинених складних вуглеводів, включаючи цукрові спирти та аміноцукри, у воді Вайт-Клей-Крік — притоки річки Крістіна на півдні Пенсільванії (США) становила 2,9–12,1%  $C_{орг}$  тоді як вільних розчинених моносахаридів — лише 0,06–0,33%  $C_{орг}$  (Gremm, 1997). Розподіл розчинених моносахаридів і полісахаридів у поверхневому мікрошарі та поверхневих водах затоки Цзяочжоу і прилеглої до неї території (Китай) також характеризується переважанням полісахаридів: у середньому 42,4–48,1% (моносахариди) і 51,9–57,6% (полісахариди) у поверхневому мікрошарі та 40,1–45,3% (моносахариди) і 54,7–59,9% (полісахариди) у поверхневих водах (Zhang et al., 2013).

Полісахариди — це важливий клас біополімерів, які синтезуються живими організмами, з яких їх можна екстрагувати (Jørgensen, 2009). Їх також називають гліканами. За різними оцінками, щорічне виробництво полісахаридів рослинами перевищує їхнє синтетичне виробництво хімічною промисловістю на кілька порядків величин (Dumitriu, 2005). На рис. 2 представлено інформацію про полісахариди, які вилучаються із рослинних і тваринних організмів у поверхневих водах, запозичену з низки публікацій (Benalaya et al., 2024; Nivedita et al., 2021; Torres et al., 2019; Yadav and Karthikeyan, 2019).

Звичайно, наведена класифікація допускає певні умовності, які зумовлені недостатнім рівнем знань в

окремі періоди досліджень полісахаридів. Як приклад, можна навести наявну вже тепер інформацію про сульфатовані полісахариди. Вважалося, що вони синтезуються переважно вищими водними рослинами (Dantas-Santos et al., 2012). Згодом появились дані про їхнє продукування морськими водоростями, а тепер стверджується, що вони властиві також і окремим прісноводним водоростям, наприклад, зеленим водоростям *Cladophora surera* (Arata et al., 2017).

Полісахариди розглядаються як полімерні молекули, які складаються з моносахаридних одиниць, сполучених глікозидними зв'язками (Cho and Jung, 2015; Dumitriu, 2005; Niaz et al., 2020; Torres et al., 2019)]. Деякі полісахариди існують у вигляді лінійних, тоді як інші — розгалужених ланцюгів (Niaz et al., 2020; Zeppenfeld et al., 2020). Їх можна загалом представити формулою  $C_x(H_2O)_y$ , де  $x$  може становити від 200 до 2500 і навіть більше одиниць (Niaz et al., 2020). Як макромолекули, вони характеризуються низкою структурних модифікацій залежно від їхнього джерела походження і вважаються набагато складнішими за структурою порівняно з іншими природними макромолекулами, такими як білки та нуклеїнові кислоти (Iddrisu et al., 2024). Як зазначено в низці публікацій (Iddrisu et al., 2024; Jing et al., 2022), полісахариди складаються з більш ніж десяти мономерів (моносахаридів), а це означає, що їхня кількість може коливатися від одинадцяти до кількох тисяч. Полісахариди можуть складатися або з одного типу мономерів (гомоглікани), або з

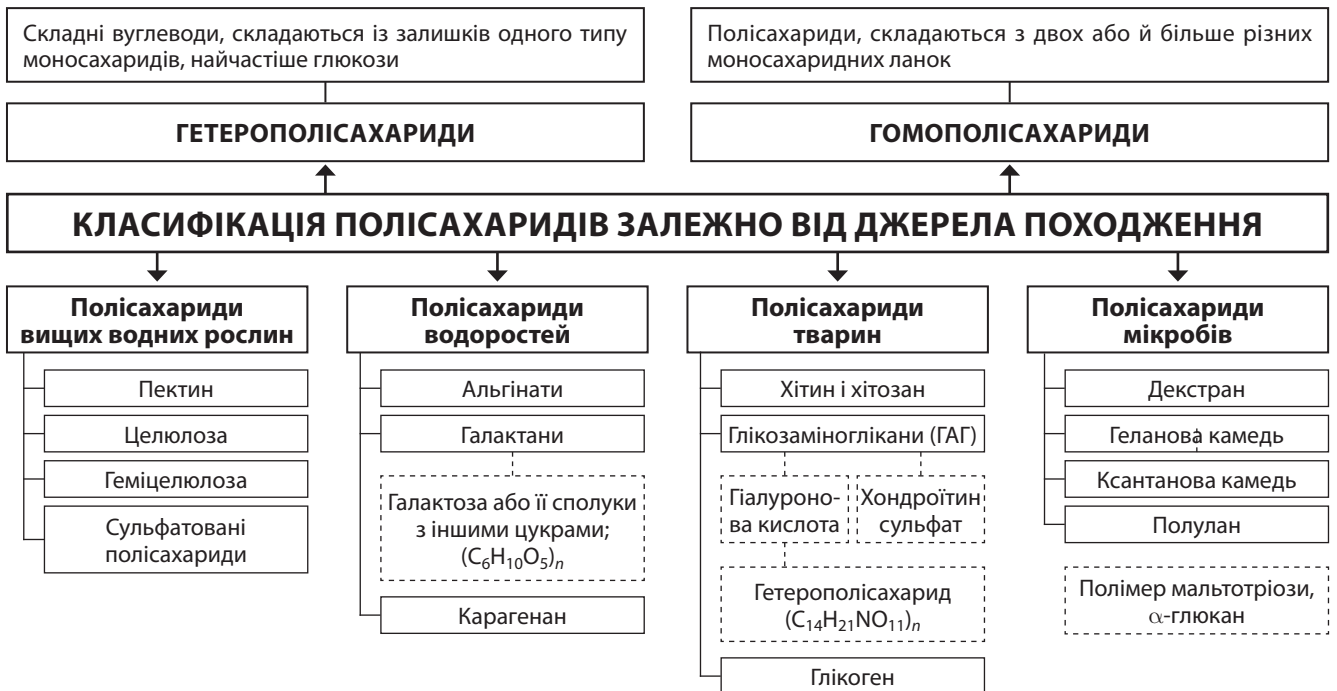


Рис. 2. Класифікація природних полісахаридів за джерелами їхнього походження

численних типів мономерів (гетероглікани), і кожна одиниця може бути сполучена з іншими різними способами. У результаті вони можуть розташовуватися в лінійні або розгалужені структури, формувати кругові форми та включати такі компоненти, як білки та ліпіди, за рахунок утворення з ними ковалентних зв'язків (Benalaya et al., 2024).

Полісахариди, такі як хітин і крохмаль, а також їхні похідні хітозан та циклодекстрини, становлять значний науковий інтерес завдяки своїй комплексоутворювальній та адсорбційній здатності (Crini and Morcellet, 2002; Joly et al., 2020; Varma et al., 2004). Комплексоутворювальна здатність високомолекулярних органічних речовин — екзометаболітів водоростей, які представлені переважно полісахаридами, обговорювалася раніше в низці наукових публікацій (Karlan et al., 1988; Lombardi and Vieira, 2000; McKnight and Morel, 1979). Наявні дані про особливості комплексоутворення Cu(II) та Cd(II) із високомолекулярними органічними сполуками (>12–14 кДа), які виділяються двома видами ціанобітів (*Microcystis aeruginosa* і *Anabaena spiroides*) та діатомовими водоростями (*Aulacoseira granulata*) як домінуючими видами фітопланктону в евтрофному водосховищі Барра Боніта (Barra Bonita reservoir), Бразилія (Gouvêa et al., 2005). Зазначається, що ці високомолекулярні сполуки — це не що інше, як полісахариди, до яких належать кислотні моносахариди.

Екзополісахариди, синтезовані мікроорганізмами, істотно відрізняються за своїм складом, а також за своїми хімічними і фізичними властивостями. Деякі з них представлені нейтральними макромолекулами, інші — поліаніонними сполуками, завдяки наявності уронових кислот, включаючи насамперед d-глюкуронову кислоту (Loaëc et al., 1997; Sutherland, 2001).

Крохмаль, глікоген, целюлоза та хітин — це приклади найпоширеніших полісахаридів. Хітин — полісахарид тваринного походження. Хітозан отримують із хітину шляхом деацетилювання. Це добре відомий гетеробіополімер (амінополісахарид 2-аміно-2-дезоксид-β-D-глюкан) на основі глюкозаміну та

фракції залишків ацетилглюкозаміну (Krishnapriya and Kandaswamy, 2010; Zalloum and Mubarak, 2013). Хітозан демонструє високу хелатувальну здатність до іонів металів завдяки наявності аміних та гідроксильних функціональних груп у його структурі (Gerente et al., 2007; Pestov and Bratskaya, 2016; Torres et al., 2019; Varma et al., 2004) (рис. 3). Схематично комплексоутворення за участі хітозану можна подати наступним чином (рис. 4).

Зазначений полісахарид — широко використовуваний біофлокулянт для видалення як твердих частинок, так і розчинених речовин (Pestov and Bratskaya, 2016; Sharma et al., 2020). Хітозан — нетоксичний, некорозійний матеріал, простий у використанні та ефективний навіть у холодній воді.

Комплекси металів з хітозаном проявляють дезінфікуючі та бактерицидні властивості, тому їх справедливо вважають потенційними лікарськими засобами та поживними речовинами (Varma et al., 2004; Zalloum and Mubarak, 2013).

Фракціонування вуглеводів за молекулярною масою дозволяє оцінити внесок окремих їхніх фракцій у загальний баланс та встановити зв'язок між високомолекулярними і низькомолекулярними сполуками. Це дає змогу зрозуміти їхню потенційну трансформацію у природному водному середовищі. Широкий діапазон молекулярної маси вуглеводів властивий цим органічним сполукам, оскільки вони характеризуються полімерною структурою. Молекулярна маса може досягати 100,0 кДа або більше залежно від кількості приєднаних мономерів. Наприклад, було виявлено, що в продуктах бактеріального розкладу зелених водоростей молекулярна маса вуглеводів коливалася в діапазоні від 0,7 до 200,0 кДа (Akiyama, 1972). У болотних водах майже 15% розчиненого Сорг було представлено вуглеводами з молекулярною масою >100,0 кДа (Sato et al., 1987). Було встановлено, що у складі вуглеводів переважають високомолекулярні сполуки (1 кДа — 0,45 мкм). За результатами досліджень Wang et al. (2013), їхня частка у воді нижніх ділянок річок Міссісіпі і Перл та затоки Сент-Луїс становила 67%, 82% та 54% відповідно.

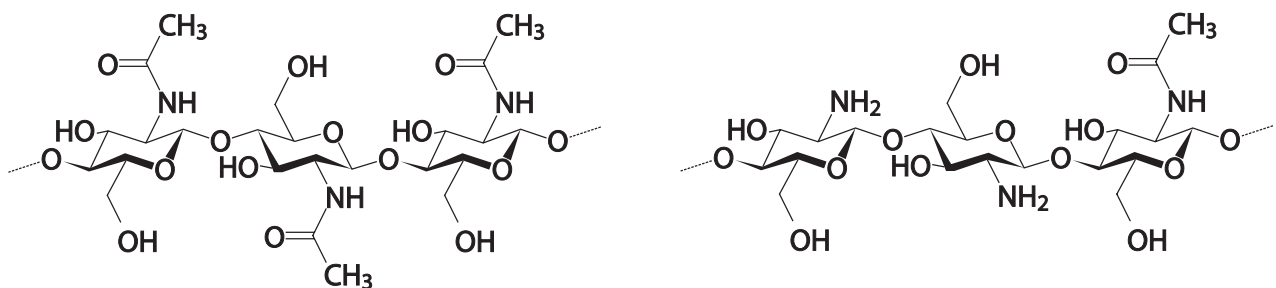


Рис. 3. Схематичне зображення макромолекул хітину (а) і хітозану (б). Наведено за Torres et al., 2019

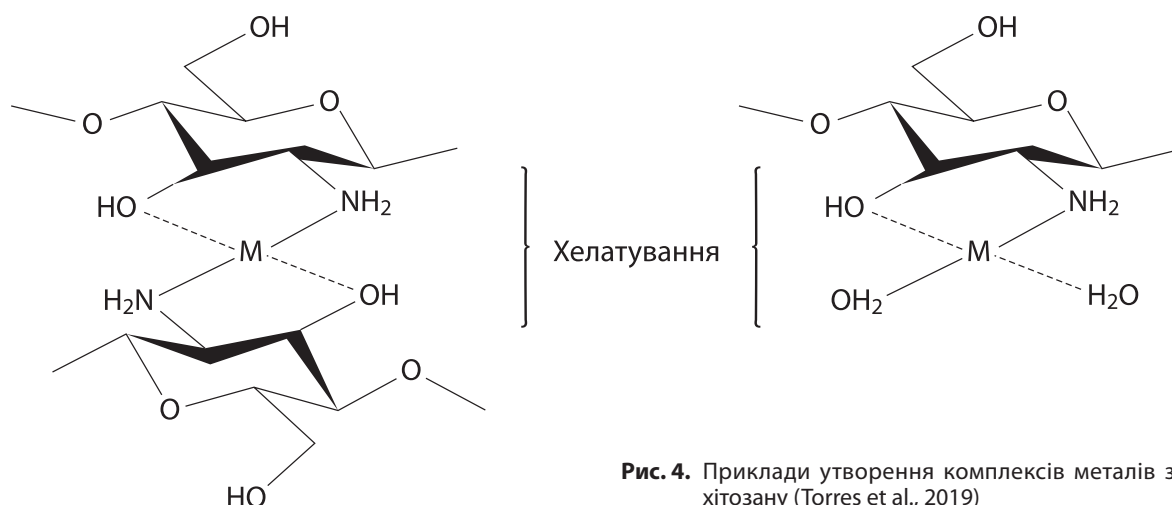


Рис. 4. Приклади утворення комплексів металів за участі хітозану (Torres et al., 2019)

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктами досліджень були поверхневі водні об'єкти різного типу, зокрема водосховища Дніпровського каскаду, озера Люцимир та Велике Чорне (Шацька озерна група), річка Прип'ять, річка Десна (гирло), річка Рось (поблизу міста Біла Церква), річка Південний Буг (поблизу міста Хмельницький), річка Серет (вище та нижче Тернопільського водосховища), Тернопільське водосховище (м. Тернопіль), а також невеликі водойми м. Києва (Київський ставок, озера Тельбін, Вербне та Алмазне, озера, які входять до озерної системи Опечень). Дослідження вуглеводів у згаданих водних об'єктах проводилися в періоди 1992–1998 та 2011–2024 років.

Проби води відбирались переважно з поверхнього горизонту (~0,5 м від поверхні) за допомогою батометра Рутнера або модифікованого батометра-склянки (Пат. 75995, 2012). Завислі речовини відокремлювали методом мембранної фільтрації під тиском близько 2 атм. У цьому випадку пробу води об'ємом 1,0–1,5 дм<sup>3</sup> фільтрували через нітроцелюлозні мембранні фільтри "Synpro" (Чехія) або через фільтри "Fioroni" (Китай) із діаметром пор 0,40 та 0,45 мкм відповідно.

Усі дослідження проводилися з фільтратами природних вод. Для вилучення та відокремлення вуглеводів від інших органічних речовин, включаючи гумусові речовини, застосовували метод іонообмінної хроматографії. Відповідно, 0,5–1 дм<sup>3</sup> фільтрату природної води послідовно пропускали через дві скляні колонки, перша з яких була заповнена діетиламіноетилцелюлозою (ДЕАЕ), а друга — карбоксиметилцелюлозою (КМ) виробництва фірми SERVA. Елюювання проводили розчинами 0,3 моль/дм<sup>3</sup> NaOH, 0,02 моль/дм<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (триступеневе елюювання з колонки з ДЕАЕ-целюлозою) та 0,1 моль/дм<sup>3</sup> HCl (елюювання з колонки з КМ-целюлозою).

Параметри колонок: довжина — 27,5 см, діаметр — 2,5 см, висота шару сорбенту — ≈4,5 см, вільний об'єм — 12,5 см<sup>3</sup>.

У результаті РОР природної води було розділено на три групи: кислотну, яка містила переважно гумусові речовини, основну з переважанням білковоподібних речовин та нейтральну, у складі якої домінували вуглеводи. Детальний опис виконаних маніпуляцій було наведено раніше (Linnik et al., 2014). Концентрацію розчинених вуглеводів визначали одразу після їхнього розділення. Вміст цих органічних сполук також визначали як суму їхніх концентрацій у фракціях після гель-хроматографічного розділення.

Саме цей метод було використано у дослідженнях молекулярно-масового розподілу вуглеводів. У цьому випадку використовували скляну колонку, заповнену гелем TOYOPEARL HW-55F (Японія). Її калібрували з використанням речовин із відомою молекулярною масою (поліетиленгліколі — 0,6, 1,0, 2,0, 15,0 та 20,0 кДа, інсулін — 5,8 кДа, альбумін — 68,0 кДа, декстран — 70 кДа та глюкоза — 0,18 кДа). Параметри колонки: довжина — 81,0 см, діаметр — 2,8 см, висота шару гелю — 60,5 см, вільний об'єм ( $V_0$ ) — 138 см<sup>3</sup>, загальний об'єм ( $V_t$ ) — 375 см<sup>3</sup>. Під час проведення гель-хроматографічних досліджень використовували концентрати нейтральної групи РОР (ступінь концентрування 10–12 разів), які пропускали через колонку. Їх отримували шляхом виморожування. Як елюент використовували фосфатний буферний розчин (0,025 моль/дм<sup>3</sup>) з рН 7,0. Після гель-хроматографічного розділення фракції об'ємом 15 см<sup>3</sup> збирали у скляні пробірки за допомогою колектора DOMBIFRAK (Україна).

Концентрацію вуглеводів визначали фотометричним методом у сильно кислому середовищі (відбувається їхній кислотний гідроліз) із використанням

антронового реагенту (Руководство..., 1977). Для побудови градувального графіка використовували розчин глюкози. Концентрацію розчинених вуглеводів у воді досліджуваних водних об'єктів виражали в розрахунку на глюкозу.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

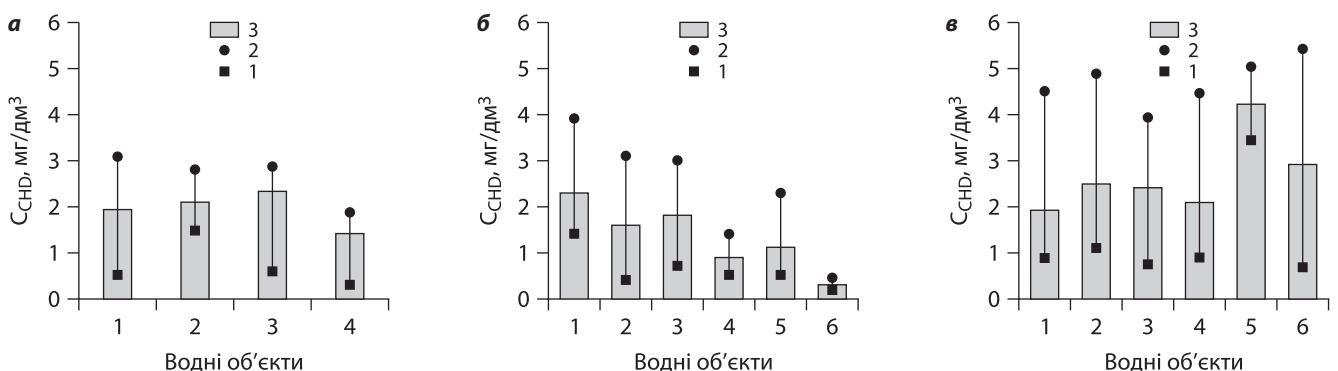
**Концентрація і закономірності розподілу вуглеводів у поверхневих водних об'єктах України.** Величини концентрації розчинених вуглеводів у поверхневих водних об'єктах України характеризуються широким діапазоном — від 0,19 до 5,43 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 5) залежно від пори року та характерних особливостей водойми. Середній вміст розчинених вуглеводів у воді досліджуваних об'єктів знаходиться у межах 0,9–4,2 мг/дм<sup>3</sup>.

Максимальні концентрації характерні для літньо-осінньої пори, коли відбувається інтенсивний розвиток фітопланктону. Вміст вуглеводів у водоймах урбанізованої території як високоевтрофних значно вищий порівняно з дніпровськими водосховищами та річками (див. рис. 5, в). Найнижчі концентрації розчинених вуглеводів характерні для деяких річкових вод, зокрема верхньої частини р. Південний Буг, р. Серет та Кілійської дельти р. Дунай.

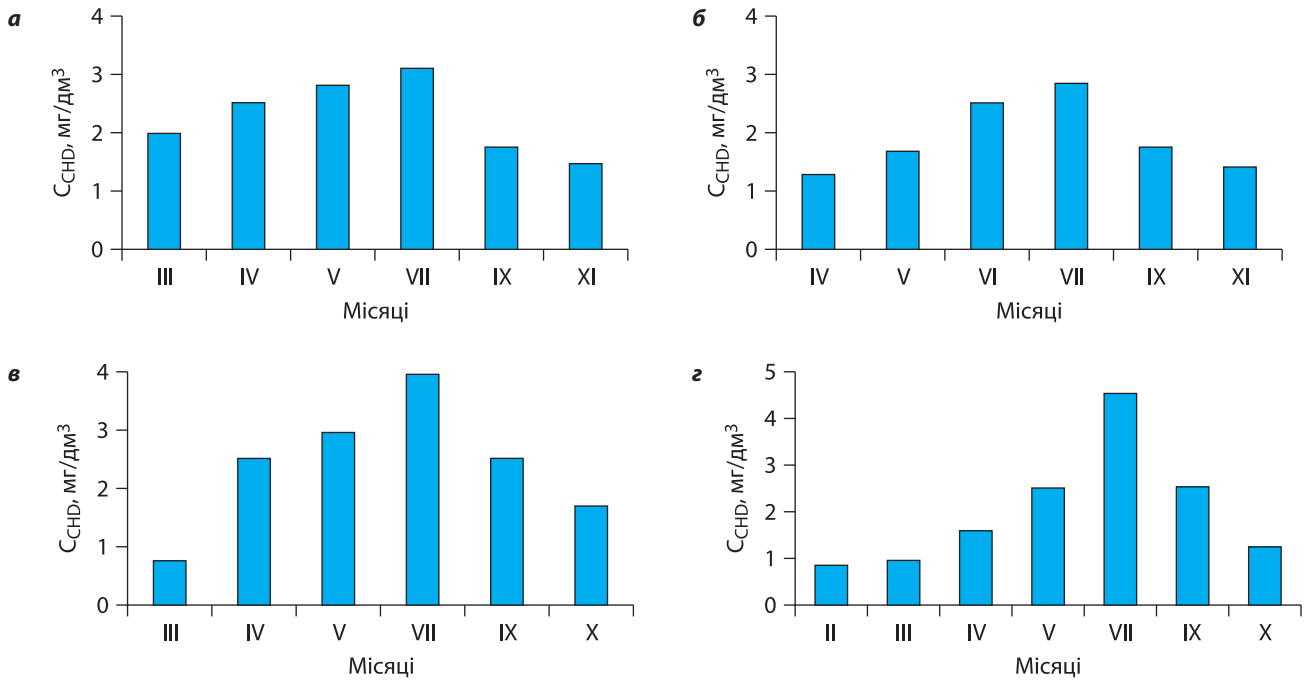
Як зазначалося вище, у складі РОР поверхневих вод вуглеводи за своїм вмістом поступаються лише гумусовим речовинам. Найбільший відсоток розчинених вуглеводів виявлено у невеликих водоймах, які розташовані у межах мегаполісу м. Києва. Наприклад, восени у деяких озерах системи Опечень він досягає 20,3–22,5% C<sub>орг</sub> (Стан водних..., 2023). Більшість досліджуваних водойм характеризується доволі високими показниками концентрації біогенних речовин, через що для них характерне значне "цвітіння" води протягом більшої частини року внаслідок інтенсивного розвитку фітопланктону.

А це слід розглядати як вагому причину накопичення вуглеводів у воді. Характерно, що ці водойми характеризуються відносно низьким рівнем гумусових речовин — 16,2–48,6% C<sub>орг</sub> (в середньому 28,7% C<sub>орг</sub>), що також сприяє розвитку водоростей. Водночас, в озерах із високим вмістом гумусових речовин внесок вуглеводів не перевищує 4,5% C<sub>орг</sub> (Aquatic ecosystems..., 2003). Частка вуглеводів також помітно зростає у воді нижньої течії річок та в естуаріях, що пов'язано, з одного боку, з уповільненням річкового стоку, а з іншого, — збільшенням інтенсивності розвитку водоростей. Наприклад, у воді нижньої течії річки Міссісіпі частка вуглеводів сягає 17–31% C<sub>орг</sub> (в середньому 24% C<sub>орг</sub>) (Wang et al., 2013).

Слід звернути увагу на методи визначення концентрації вуглеводів у зразках поверхневих вод. Як оригінальні, так і літературні дані (Лозовик и др., 2012) свідчать про те, що пряме визначення вмісту вуглеводів у фільтрованій воді може давати завищені результати, особливо у воді з доволі високим вмістом гумусових речовин. Відомо, що гумусові речовини — це продукти конденсації лігніну та вуглеводів. Вуглеводи вивільняються із їхнього складу у процесі кислотного гідролізу. У результаті дані про їхню концентрацію значно вищі від тих, які отримано за відсутності гумусових речовин після адсорбції останніх на колонці з ДЕАЕ-целюлозою. Таким чином, якщо гумусові речовини не вилучати з води, то у цьому разі визначаються розчинені вуглеводи, які містяться як у самій воді, так і у складі гумусових речовин. Тому в річках басейну р. Прип'ять, які характеризуються найвищим вмістом гумусових речовин, прямий аналіз розчинених вуглеводів (без попереднього видалення гумусових речовин) показав доволі високі значення їхньої концентрації (див. рис. 5, б). Таким чином, гумусові речовини слід



**Рис. 5.** Мінімальні (1), максимальні (2) та усереднені (3) концентрації розчинених вуглеводів (CCHD) у поверхневих водних об'єктах України різного типу: а — водосховища Дніпровського каскаду (1 — Київське, 2 — Канівське, 3 — Кременчуцьке, 4 — Каховське); б — річки (1 — Прип'ять, 2 — Десна, 3 — Рось, 4 — Південний Буг, 5 — Серет, 6 — Кілійська дельта Дунаю); в — водойми урбанізованих територій: 1 — Тернопільське водосховище, м. Тернопіль, 2–6 — малі водойми м. Києва (2 — другий Китаївський ставок, 3 — оз. Тельбін, 4 — оз. Вербне, 5 — оз. Алмазне, 6 — озера системи Опечень)



**Рис. 6.** Зміни концентрації розчинених вуглеводів у воді досліджуваних водойм протягом року: а — нижня ділянка Київського водосховища; б — верхня ділянка Канівського водосховища, Оболонська затока; в — оз. Тельбін; г — оз. Вербне

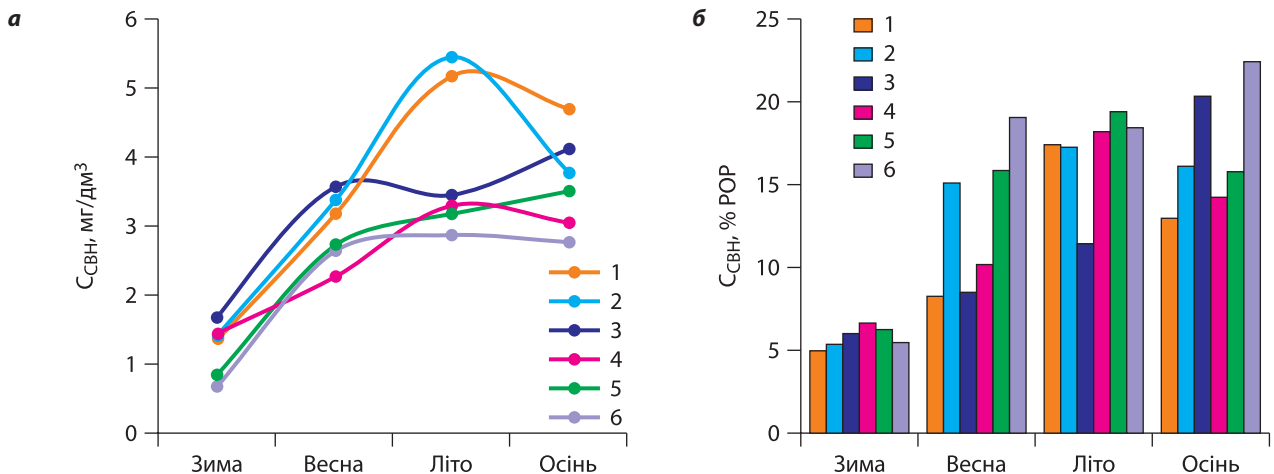
вилучати з природної води перед визначенням концентрації вуглеводів.

Концентрація розчинених вуглеводів змінюється посезонно. Найвищі її значення, зазвичай, характерні для літньої пори року, коли активно розвиваються фітопланктон та вища водна рослинність. Про це свідчать наведені нижче дані щодо концентрації розчинених вуглеводів у воді водосховищ Дніпровського каскаду та невеликих озер у межах м. Києва (рис. 6). Видно, що максимальні концентрації вуглеводів припадають на весняно-літню пору року. Наведені дані ще раз слугують підтвердженням того,

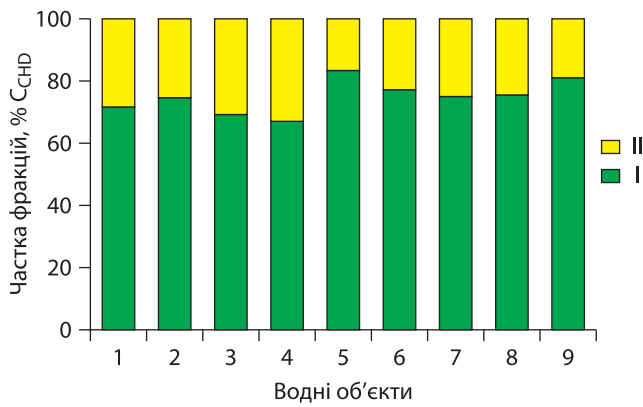
що фітопланктон — основне джерело розчинених вуглеводів.

Сезонні зміни концентрації вуглеводів та їхньої частки у загальній концентрації POP проявляються з особливою виразністю у малих озерних системах урбанізованих територій. Про це свідчать наведені нижче дані (рис. 7) стосовно сезонної динаміки вуглеводів у воді окремих озер, які входять до системи озер Опечень, м. Київ.

Згідно з результатами гель-хроматографічних досліджень було виявлено, що розчинені вуглеводи у досліджуваних водних об'єктах представлені



**Рис. 7.** Сезонна динаміка концентрації вуглеводів (мг/дм<sup>3</sup>) та їхньої частки (%) від загального вмісту POP у воді окремих озер системи Опечень 2021 р. Цифрами 1–6 позначено озера Мінське, Лугове, Пташине, Богатирське, Кирилівське і Йорданське відповідно



**Рис. 8.** Частка різних фракцій вуглеводів (I — полісахариди, II — моносахариди) у досліджуваних водних об'єктах (% ССНД): 1, 2 — озера Люцимир і Велике Чорне (Шацька група); 3 — Тернопільське водосховище; 4 — Канівське водосховище, рукав Десенка; 5–8 — річки Десна, Рось, Південний Буг, Серет відповідно; 9 — другий Китайський ставок

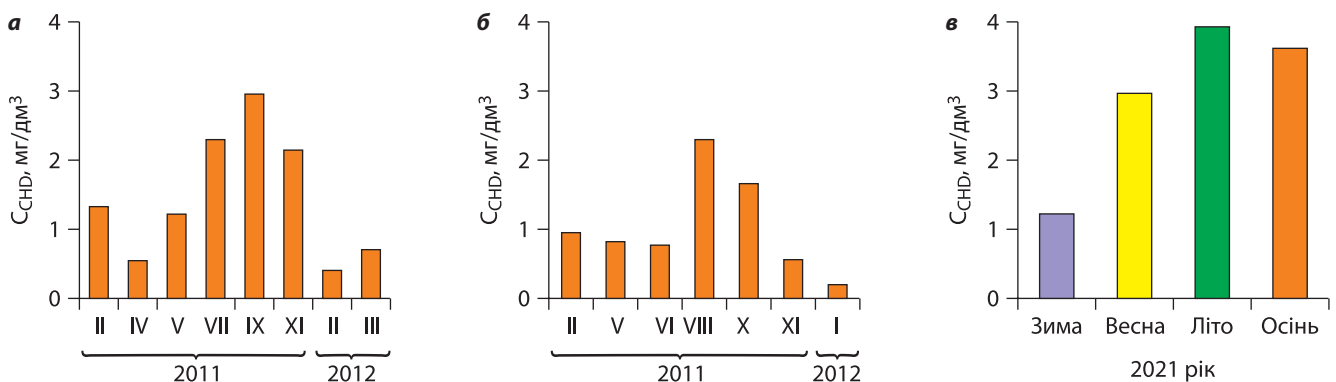
переважно полісахаридами. Їхній внесок варіює від 67,7 до 83,7% від загальної концентрації розчинених вуглеводів (рис. 8).

Водночас, у деяких публікаціях (Gueguen et al., 2006; Hung et al., 2005; Steen et al., 2008) йдеться про домінування моносахаридів у складі розчинених вуглеводів. У поверхневих водах співвідношення між окремими фракціями вуглеводів залежить значною мірою від впливу чинників навколишнього середовища, включаючи, передусім, температуру води, інтенсивність фотохімічних реакцій, швидкість ферментативного гідролізу полісахаридів та асиміляцію моносахаридів водоростями і бактеріопланктоном (Khodse et al., 2010; Steen et al., 2008). Сполуки з полімерною структурою переважають у процесі активного вивільнення вуглеводів водоростями (Chróst et al., 1989). Згодом вони трансформуються у простіші сполуки — моносахариди. У результаті співвідношення між цими двома фракціями змінюється. Наприклад, вміст вільних редукованих цукрів у воді Київського водосховища взимку становив

34,0% від загального вмісту розчинених вуглеводів, тоді як восени він збільшувався до 69,0% (Vasil'chuk and Linnik, 1998). Збільшення концентрації моносахаридів у воді річки Юкон було помітним у період з травня по вересень (Gueguen et al., 2006).

Як було вже показано вище, концентрація розчинених вуглеводів у поверхневих водних об'єктах зазнає сезонних змін. Однак ці зміни не завжди чітко виражені. Максимальний вміст розчинених вуглеводів у деяких водних об'єктах проявляється на початку весни та влітку (озера Люцимир та Велике Чорне (Шацька група озер), Тернопільське водосховище), тоді як в інших — влітку та на початку осені. До них належать річки Десна і Серет, а також озера системи Опечень (рис. 9). Зміни концентрації розчинених вуглеводів у деяких водоймах не мають якогось вираженого характеру (р. Південний Буг та 2-й Китайський ставок). Така ж картина змін концентрації розчинених вуглеводів підтверджується результатами інших досліджень. Наприклад, у водосховищі Лобо (Бразилія) максимальний вміст цих органічних сполук спостерігався у червні, вересні, листопаді (найвищий вміст) та січні (Striquer-Soares and Chevolut, 1996). Такі сезонні зміни концентрації розчинених вуглеводів у поверхневих водах не слід розцінювати як несподівані. Адже ці сполуки вивільняються під час розвитку гідробіоти і, водночас, використовуються багатьма водними організмами у процесі їхньої життєдіяльності. Ці два чинники впливають на мінливість вмісту вуглеводів протягом року. При цьому більш помітні коливання характерні для моносахаридів, які належать до легкозасвоєваних сполук.

**Молекулярно-масовий розподіл вуглеводів та співвідношення їхніх різних фракцій.** За результатами багаторічних досліджень встановлено, що у поверхневих водних об'єктах України молекулярна маса вуглеводів змінюється в широких межах — від <1,0 до >70,0 кДа (рис. 10). Наявна інформація про те, що верхня межа молекулярної маси вуглево-



**Рис. 9.** Сезонні зміни концентрації розчинених вуглеводів у воді річок Десна (а), Серет (б) та озер системи Опечень (в)

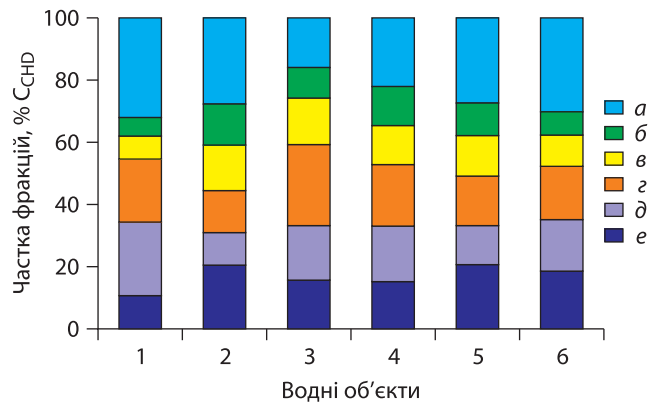
дів може бути навіть більшою (Pestov and Bratskaya, 2016; Akiyama, 1972) за ту, яку ми встановили в результаті проведених досліджень.

Відомо, що фітопланктон та вищі водні рослини виділяють переважно полісахариди, які зазнають подальшої трансформації. У результаті вміст окремих фракцій розчинених вуглеводів також змінюється від сезону до сезону. Але домінують високомолекулярні сполуки (полісахариди). Як зазначалося вище, широкий діапазон молекулярної маси вуглеводів характерний для цих природних органічних сполук, оскільки вони характеризуються полімерною структурою. Середній річний вміст фракцій з молекулярною масою >70,0 кДа становить 10,8–20,9%, 70,0–50,0 кДа — 10,7–23,4%, 50,0–20,0 кДа — 13,7–25,9%, 20,0–5,0 кДа — 7,7–15,0% та 5,0–1,0 кДа — 5,8–12,7% від загальної концентрації розчинених вуглеводів ( $C_{\text{СНД}}$ , рис. 11). Внесок фракції низькомолекулярних вуглеводів (<1,0 кДа) становив 16,3–32,3%. Відомо, що ця фракція містить прості цукри — моносахариди та дисахариди. Наведені дані — переконливе свідчення домінування високомолекулярних сполук у складі розчинених вуглеводів. Звичайно, вони належать до легкоокиснюваних органічних речовин і зазнають трансформацій.

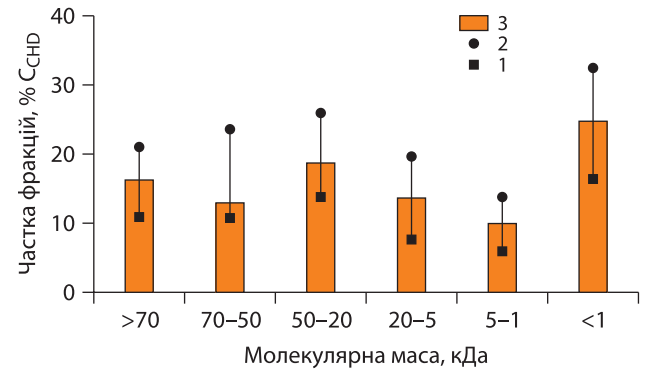
Більша частина низькомолекулярних вуглеводів (вільних редукованих цукрів) утворюється влітку, коли підвищується температури води та інтенсифікуються мікробіологічні і фотохімічні процеси. Прикладом прояву цієї закономірності може бути Оболонська затока Канівського водосховища (рис. 12). Однак слід зазначити, що низькомолекулярна фракція розчинених вуглеводів активно асимілюється водоростями та бактеріями (Chróst et al., 1989; Jørgensen, 2009; Striquer-Soares and Chevolut, 1996). Це явище спостерігалось в Тернопільському водосховищі та в оз. Люцимир (рис. 13), а також в інших досліджуваних нами водних об'єктах.

Видно, що частка розчинених вуглеводів із найнижчою молекулярною масою (<1 кДа) помітно зменшується влітку та восени, що пов'язано з їхнім засвоєнням водними організмами. Ця частка збільшується зі зниженням інтенсивності гідробіологічних процесів пізньої осені. Здатність бактерій засвоювати глюкозу широко використовується як показник мікробної активності в природних водах (Steen et al., 2008). Відносний вміст високомолекулярних фракцій також змінюється. Однак відомо, що вони гірше засвоюються гетеротрофними мікроорганізмами. Вони повинні розкладатися до простих вуглеводів за участю ферментів (Chróst et al., 1989; Jørgensen, 2009).

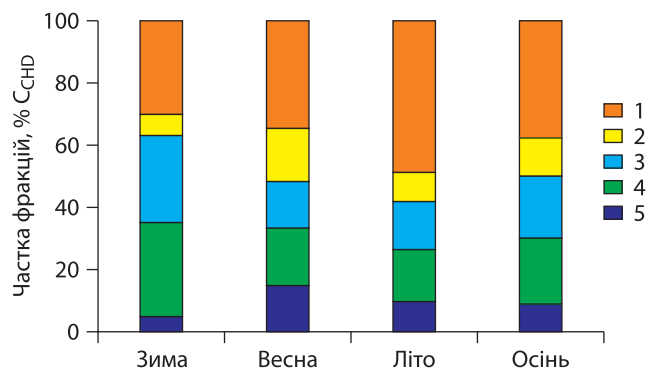
Практичне застосування полісахаридів. Як зазначається в оглядовій статті (Li et al., 2022), біологічна



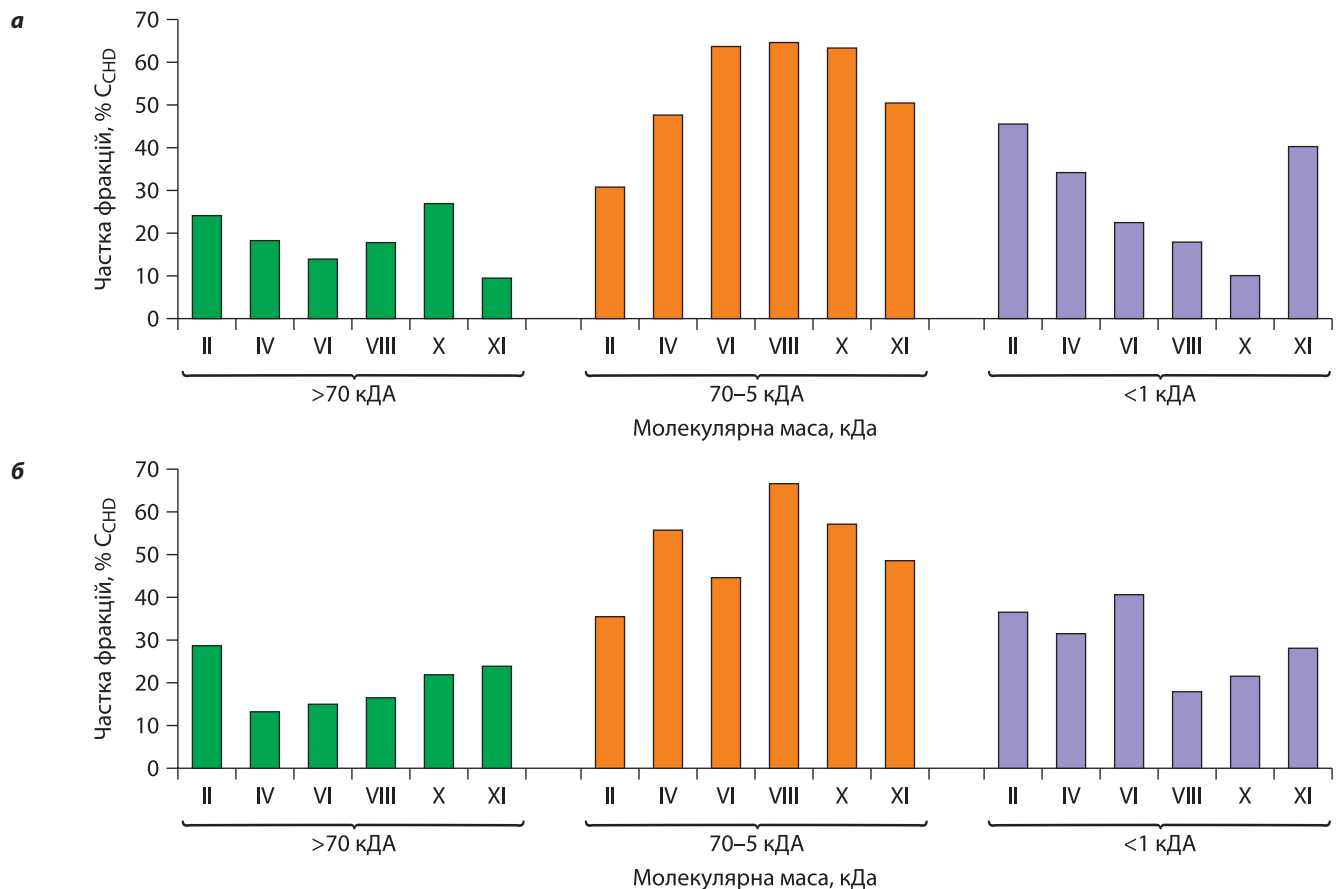
**Рис. 10.** Частка різних фракцій вуглеводів (у% до їхньої загальної концентрації) у воді досліджуваних водних об'єктів (за середньорічними показниками): 1 — Канівське водосховище; 2 — оз. Люцимир; 3 — р. Десна; 4 — р. Рось; 5 — р. Південний Буг, 6 — Тернопільське водосховище. Молекулярна маса фракцій, кДа: 1 — >70; 2 — 70–50; 3 — 50–20; 4 — 20–5; 5 — 5–1; 6 — <1



**Рис. 11.** Частка фракцій різної молекулярної маси у загальному балансі розчинених вуглеводів (%  $C_{\text{СНД}}$ ) у досліджуваних водних об'єктах України (за усередненими показниками)



**Рис. 12.** Сезонна динаміка відносної частини (%) різних фракцій вуглеводів у воді Оболонської затоки Канівського водосховища, 2016–2018 рр. (за результатами досліджень Осипенко В.П.) Концентрація вуглеводів, мг/дм<sup>3</sup>: зима — 1,26; весна — 2,46; літо — 3,84; осінь — 2,57. Молекулярна маса фракцій, кДа: 1 — >30; 2 — 30–20; 3 — 20–10; 4 — 10–1; 5 — <1



**Рис. 13.** Сезонні зміни відносного вмісту окремих фракцій розчинених вуглеводів з різною молекулярною масою у воді Тернопільського водосховища (а) та оз. Люцимир (б), 2011 р. Місяці позначено римськими цифрами

активність полісахаридів тісно корелює з їхньою молекулярною структурою. Наприклад, біологічна активність полісахаридів, екстрагованих з грибів, значно залежить від їхньої молекулярної маси, складу моносахаридів, конфігурації розгалуження, конформації та інших структурних особливостей (Wang X.Y. et al., 2019). Більше того, хімічна модифікація полісахаридів може покращити їхні біологічні властивості та надати їм нову функціональну активність.

Багато полісахаридів, таких як крохмаль, целюлоза, карагенан та альгінат, промислово видобувають у великих масштабах для використання як стабілізаторів, допоміжних речовин, загусників та гелеутворювачів (Torres et al., 2019)]. Природні полісахариди також можна комбінувати з іншими матеріалами для утворення нових композитів із покращеними властивостями (Boughanmi et al., 2025). Такі композити застосовуються для видалення забруднювальних речовин, зокрема важких металів, з поверхневих та стічних вод (Boughanmi et al., 2025; Ciani et al., 2025; Sharma et al., 2020). Наприклад, хітозан, змішаний з пектином, демонструє покращену адсорбцію йонів із водних середовищ. Наявність

карбокислих груп у пектині та аміногруп у хітозані значно підвищує ефективність видалення йонів важких металів (Boughanmi et al., 2025). Протягом останнього десятиліття нанокompозитні матеріали на основі полісахаридів отримали значну увагу як перспективні агенти для очищення стічних вод (Al-Hazmi et al., 2024). Це надзвичайно важливо з позицій відновлення стану забруднених об'єктів довкілля, передусім невеликих водойм, які зазнають антропогенного навантаження.

Полісахариди демонструють широкий спектр біомедичної активності, включаючи антиоксидантну, протипухлинну, протидіабетичну та імунomodulatory дію, і широко застосовуються у виготовленні ліків, тканинній інженерії та як біоматеріали завдяки своїй біосумісності та біорозкладанню (Benalaya et al., 2024; Ullah et al., 2019; Yadav and Karthikeyan, 2019).

Численні дослідження підкреслюють їхнє широке використання у фармацевтичній та біомедичній галузях, зокрема як терапевтичних засобів (Benalaya et al., 2024; Ullah et al., 2019; Yadav and Karthikeyan, 2019). Згідно з оглядом, який присвячено властивостям та практичному застосуванню по-

лісахаридів, у медичній промисловості вони переважно використовуються як фармацевтичні препарати та біоматеріали (наприклад, гіпоглікемічні, протиостеоартритні та протипухлинні засоби) для пом'якшення наслідків метаболічних синдромів (Li et al., 2022).

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень було встановлено, що у поверхневих водних об'єктах України концентрація розчинених вуглеводів коливається в широкому діапазоні, складаючи 0,19–5,43 мг/дм<sup>3</sup>. Різні за типом водні об'єкти відрізняються за вмістом вуглеводів. Найвищі концентрації останніх (4,5 та 5,43 мг/дм<sup>3</sup>) виявлено у невеликих водоймах урбанізованих територій, що зумовлено інтенсивним розвитком в них фітопланктону. Розчинені вуглеводи посідають друге місце за вмістом після гумусових речовин у складі розчинених органічних речовин. Частка розчинених вуглеводів у загальному балансі РОР у досліджуваних водних об'єктах України коливається від 2,2 до 36,1%  $C_{\text{орг}}$  (у середньому їхній внесок становить 4,7–16,4%  $C_{\text{орг}}$ ). У водосховищах Дніпровського каскаду частка вуглеводів становить у середньому 2,3–10,0%  $C_{\text{орг}}$ . Концентрація розчинених вуглеводів залежить від інтенсивності розвитку фітопланктону та вищих водних рослин, які слід розглядати як основні джерела їхнього надходження у водне середовище. Таким чином, рівень накопичення вуглеводів у воді можна оцінити за ступенем трофічного статусу водойми. Однак гетеротрофні мікроорганізми живляться вуглеводами. Ці сполуки засвоюються водоростями та мікроорганізмами у процесі їхньої життєдіяльності. Концентрація розчинених вуглеводів у водному середовищі збільшується зі зростанням фотосинтезу навесні та влітку. Водночас асиміляція гідробіонтами призводить до зменшення їхнього вмісту.

Сезонні зміни концентрації розчинених вуглеводів відрізняються у різних водних об'єктах. Їхній максимальний вміст проявляється по-різному: в одних водоймах навесні та влітку, тоді як в інших —

наприкінці літа і восени. У деяких водоймах трапляються й такі випадки, коли максимальна концентрація вуглеводів чергується з їхнім мінімальним вмістом. Ймовірно, це явище зумовлене впливом деяких факторів водного середовища. Температура води та інтенсивність мікробіологічних і фотохімічних процесів, ймовірно, мають значний вплив на вміст розчинених вуглеводів.

У результаті проведених гель-хроматографічних досліджень було виявлено, що молекулярна маса розчинених вуглеводів змінюється в широкому діапазоні — від <1,0 до >70,0 кДа. Однак переважають полісахариди. Їхній відносний вміст у загальному балансі вуглеводів становить у середньому 67,7–83,7%.

Внесок низькомолекулярних сполук (<1,0 кДа) не перевищує 16,3–32,3%  $C_{\text{СНД}}$ . Мінімальний вміст цих сполук спостерігається переважно влітку. Полісахариди трансформуються в прості цукри за дії процесів, які відбуваються у водному середовищі. Однак, поряд із їхнім накопиченням у воді відбувається засвоєння цих сполук гідробіонтами. Іноді засвоєння переважає над накопиченням низькомолекулярних сполук. Вміст низькомолекулярних сполук розчинених вуглеводів помітно зростає в окремі пори року. Наприклад, восени та взимку у воді Тернопільського водосховища внесок сполук із молекулярною масою <1,0 кДа становив 40,1–45,4%  $C_{\text{СНД}}$ . Цей факт свідчить про те, що інтенсивність засвоєння низькомолекулярних розчинених вуглеводів водними організмами зменшується за низької температури води. У результаті вони накопичуються у водному середовищі.

Наразі полісахариди, як важливий компонент розчинених вуглеводів, знаходять широке практичне застосування, зокрема для нейтралізації токсичної дії металів у водному середовищі, видалення важких металів та інших забруднювальних речовин зі стічних вод, а також у медицині та фармакології для лікування різних захворювань і розробки ефективних лікарських засобів. Відповідно, їхнє подальше дослідження стає дедалі актуальнішим.

## ЛІТЕРАТУРА

- Линник П.М., Жежеря В.А., Линник Р.П. (2019). Дослідження співіснуючих форм хімічних елементів у природних поверхневих водах як один з пріоритетних напрямків розвитку сучасної гідрохімії. *Проблеми гідрології, гідрохімії і гідроекології*. Київ: Ніка-Центр, 165–180.
- Лозовик П.А., Ефремова Т.А., Сабылина А.В. (2012). Углеводы и липиды в разнотипных водных объектах Карелии в летний период 2011 г. *Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием (10–14 сентября 2012 г., Петрозаводск, Россия)*. Петрозаводск, 373–376.
- Пат. 75995 Україна, МПК51 (2012.01) G 01 N 1/00. (2012). Модифікований батометр-склянка: винахідник Жежеря В.А., власник Інститут гідробіології НАН України. № u201205246; заявл. 27.04.12; опубл. 25.12.12, Бюл. № 24.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши (1977). Под ред. А.Д. Семенова. Ленинград: Гидрометеоздат.
- Сакевич О.Й., Усенко О.М. (2008). Алелопатія в гідроекосистемах. Київ: Інститут гідробіології НАН України.
- Стан водних об'єктів урбанізованих територій. Озера системи Опечень. (2023). За ред. д-ра хім. наук, проф. Линника П.М. Київ: Інститут гідробіології НАН України.

- Хільчевський В.К. (2022). Гідрохімічний словник. Київ: ДІА.
- Akiyama T. (1972). Chemical composition and molecular weight distribution of dissolved organic matter produced by bacterial degradation of green algae. *Geochem. J.*, **6**, 93–104.
- Alberts J.J. (1988). Dissolved carbohydrate distribution and dynamics in two southeastern United States reservoirs. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **45**, 325–332.
- Al-Hazmi H.E., Łuczak J., Habibzadeh S., Hasanin M.S., Mohammadi A., Esmaeili A., Kim S.-J., Yazdi M.K., Rabiee N., Badawi M., Saeb M.R. (2024). Polysaccharide nanocomposites in wastewater treatment: a review. *Chemosphere*, **347**, Article number 140578, 17 p. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140578>
- Aquatic ecosystems: interactivity of dissolved organic matter. (2003). Ed. by S.E.G. Findlay & R.L. Sinsabaugh. San Diego: Academic Press.
- Arata P.X., Alberghina J., Confalonieri V., Errea M.I., Estevez J.M., Ciancia M. (2017). Sulfated polysaccharides in the freshwater green macroalga *Cladophora surera* not linked to salinity adaptation. *Front. Plant Sci.*, **8**, Article number 1927, 10 p. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01927>
- Benalaya I., Alves G., Lopes J., Silva L.R. (2024). A review of natural polysaccharides: sources, characteristics, properties, food, and pharmaceutical applications. *Int. J. Mol. Sci.*, **25**, Article number 1322, 32 p. <https://doi.org/10.3390/ijms25021322>
- Biersmith A., Benner R. (1998). Carbohydrates in phytoplankton and freshly produced dissolved organic matter. *Mar. Chem.*, **63**, 131–144.
- Boughanmi R., Oelmann M., Steinbach C., Schwarz S. (2025). Sustainable polyelectrolyte complexes of pectin and chitosan as adsorbents for heavy metal ions from surface water. *J. Polym. Sci.*, **63**, 133–145.
- Cho E., Jung S. (2015). Supramolecular complexation of carbohydrates for the bioavailability enhancement of poorly soluble drugs. *Molecules*, **20**, 19620–19646. <https://doi.org/10.3390/molecules201019620>
- Chróst R.J., Münster U., Rai H., Albrecht D., Witzel P.K., Overbeck J. (1989). Photosynthetic production and exoenzymatic degradation of organic matter in the euphotic zone of a eutrophic lake. *J. Plankton Res.*, **11**(2), 223–242.
- Ciani M., Lepore G.O., Puri A., Facchetti G., Adessi A. (2025). Exploring metal interactions with released polysaccharides from *Cyanotheca* sp. CE4: a chemical and spectroscopic study on biosorption mechanism. *Polymers*, **17**, Article number 371, 17 p. <https://doi.org/10.3390/polym17030371>
- Crini G., Morcellet M. (2002). Synthesis and applications of adsorbents containing cyclodextrins. *J. Sep. Sci.*, **25**, 789–813.
- Dantas-Santos N., Gomes D.L., Costa L.S., Cordeiro S.L., Costa M.S.S.P., Trindade E.S., Franco C.R.Ch., Scortecci K.C., Leite E.L., Rocha H.A.O. (2012). Freshwater plants synthesize sulfated polysaccharides: heterogalactans from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Int. J. Mol. Sci.*, **13**, 961–976. <https://doi.org/10.3390/ijms13010961>
- D'Ayala G.G., Malinconico M., Laurienzo P. (2008). Marine derived polysaccharides for biomedical applications: chemical modification approaches. *Molecules*, **13**, 2069–2106.
- Dumitriu S. (2005). Polysaccharides: structural diversity and functional versatility (2<sup>nd</sup> ed.). Marcel Dekker, New York, NY, USA. ISBN 0-8247-5480-8.
- Gerente C., Lee V.K.C., Le Cloirec P., McKay G. (2007). Application of chitosan for the removal of metals from wastewaters by adsorption — mechanisms and models review. *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.*, **37**(1), 41–127.
- Gouvêa S.P., Vieira A.A.H., Lombardi A.T. (2005). Copper and cadmium complexation by high molecular weight materials of dominant microalgae and of water from a eutrophic reservoir. *Chemosphere*, **60**, 1332–1339.
- Gremm T.J. (1997). Dissolved carbohydrates in streamwater determined by HPLC and pulsed amperometric detection. *Limnol. Oceanogr.*, **42**(2), 385–393.
- Gueguen C., Guo L., Wang D., et al. (2006). Chemical characteristic and origin of dissolved organic matter in the Yukon River. *Biogeochem.*, **77**, 139–155.
- Haiber S., Herzog H., Burba P., Gosciniaik B., Lambert J. (2001). Quantification of carbohydrate structures in size fractionated aquatic humic substances by two-dimensional nuclear magnetic resonance. *Fresenius J. Anal. Chem.*, **369**, 457–460.
- Hung C.C., Warnken K.W., Santschi P.H. (2005). A seasonal survey of carbohydrates and uronic acids in the Trinity River, Texas. *Org. Geochem.*, **36**, 463–474.
- Iddrisu L., Danso F., Cheong K.-L., Fang Z., Zhong S. (2024). Polysaccharides as protective agents against heavy metal toxicity. *Foods*, **13**, Article number 853, 27 p. <https://doi.org/10.3390/foods13060853>
- Jing Y., Zhang S., Li M., Zhang R., Zhang H., Zheng Y., Zhang D., Wu L. (2022). Structural characterization and biological activities of polysaccharide iron complex synthesized by plant polysaccharides: a review. *Front. Nutr.*, **9**, Article number 1013067, 17 p. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1013067>
- Joly N., Ghemati D., Aliouche D., Martin P. (2020). Interaction of metal ions with mono- and polysaccharides for wastewater treatment: a review. *Nat. Prod. Chem. Res.*, **8**(3), Article number 373, 17 p. <https://doi.org/10.35248/2329-6836.20.8.373>
- Jørgensen N.O.G. (2009). Carbohydrates. In: Likens G.E. (Ed.), *Encyclopedia of inland waters*, **2**, 727–742. Oxford: Elsevier.
- Kaplan D., Christiaen D., Arad S.M. (1988). Binding of heavy metals by algal polysaccharides. In: Stadler, T., Mollion, J., Christiaen, D. (Eds.), *Algal Biotechnology*, 179–187. New York, USA: Elsevier Applied Sciences.
- Khodse V.B., Bhosle N.B., Matondkar S.G.P. (2010). Distribution of dissolved carbohydrates and uronic acids in a tropical estuary, India. *J. Earth Syst. Sci.*, **119**(4), 519–530.
- Koivula N., Hänninen K. (2001). Concentrations of monosaccharides in humic substances in the early stages of humification. *Chemosphere*, **44**, 271–279.
- Krishnapriya K.R., Kandaswamy M. (2010). A new chitosan biopolymer derivative as metal-complexing agent: Synthesis, characterization, and metal (II) ion adsorption studies. *Carbohydr. Res.*, **345**(14), 2013–2022.
- Li X., Jiang F., Liu M., Qu Y., Lan Z., Dai X., Huang C., Yue X., Zhao S., Pan X., Zhang C. (2022). Synthesis, characterization, and bioactivities of polysaccharide metal complexes: a review. *J. Agric. Food Chem.*, **70**, 6922–6942.
- Linnik P.M. (2020). Role of organic substances-exometabolites in migration and detoxification of metals in surface waters (a review). *Hydrobiol. J.*, **56**(5), 92–109.
- Linnik P.N., Ivanechko Ya.S. (2014). Dissolved carbohydrates in the surface water bodies of Ukraine. *Hydrobiol. J.*, **50**(6), 87–107.
- Linnik P.N., Zhezhera V.A., Ivanechko Ya.S., Linnik R.P. (2014). Humic substances and their role in migration of metals in the high colored surface waters: the case study of rivers of the Pripyat' River basin. *Russ. J. Gen. Chem.*, **84**(13), 2572–2587.
- Loaëc M., Olier R., Guezennec J. (1997). Uptake of lead, cadmium and zinc by a novel bacterial exopolysaccharide. *Wat. Res.*, **31**(5), 1171–1179.
- Lombardi A.T., Vieira A.A.H. (2000). Copper complexation by cyanophyta and chlorophyta exudates. *Phycologia*, **39**(2), 118–125.
- McKnight D.M., Morel F.M.M. (1979). Release of weak and strong copper-complexing agents by algae. *Limnol. Oceanogr.*, **24**(5), 823–837.
- Niaz K., Khan F., Shah M.A. (2020). Analysis of carbohydrates (monosaccharides, polysaccharides). In: *Recent Advances in Natural Products Analysis*, **Chapter 18**, 621–633. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00018-4>

- Nivedita Pujari S., Arun K. Shettar, Joy Hoskeri H. (2021). Applications of polysaccharides in nutrition and medicine. In: Inamuddin, Mohd Imran Ahamed, Rajender Boddula, Tariq Altalhi (Eds.), *Polysaccharides: properties and applications*, **Chapter 30**, 657–682. Scrivener Publishing LLC.
- Osadchyy V., Nabyvanets B., Linnik P., Osadcha N., Nabyvanets Yu. (2016). Processes determining surface water chemistry. Switzerland: Springer International Publishing.
- Pakulski J.D., Benner R. (1994). Abundance and distribution of carbohydrate in the ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **39**(4), 930–940.
- Paulsen B.S., Aslaksen T. (1998). Extracellular polysaccharides from *Ankistrodesmus densus* (Chlorophyceae). *J. Phycol.*, **34**, 638–641.
- Pestov A., Bratskaya S. (2016). Chitosan and its derivatives as highly efficient polymer ligands. *Molecules*, **21**, Article number 330, 35 p. <https://doi.org/10.3390/molecules21030330>
- Satoh Y., Shoji S., Satoh H., Takahashi M. (1987). Dissolved organic matter in colored water from mountain bog pools in Japan. I. Seasonal changes in the concentration and molecular weight distribution. *Arch. Hydrobiol.*, **110**, 589–603.
- Sharma A., Sharma P.K., Malviya R. (2020). Utilization of polysaccharides and their derivatives in the removal of metal ions: role and recent advancement. *Current Materials Science*, **13**, 15 p.
- Steen A.D., Hamdan L.J., Arnosti C. (2008). Dynamics of dissolved carbohydrates in the Chesapeake Bay: Insights from enzyme activities, concentrations, and microbial metabolism. *Limnol. Oceanogr.*, **53**(3), 936–947.
- Striquer-Soares F., Chevolut L. (1996). Particulate and dissolved carbohydrates and proteins in Lobo Reservoir (Sao Paulo State, Brazil): relationships with phytoplankton. *J. Plankton Res.*, **18**(4), 521–537.
- Sutherland I.W. (2001). Biofilm exopolysaccharides: a strong and sticky framework. *Microbiology*, **147**, 3–9.
- Terzić S., Ahel M., Cauwet G., Malej A. (1998). Group-specific phytoplankton biomass/dissolved carbohydrate relationships in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic). *Hydrobiologia*, **363**, 191–205.
- Torres F.G., Troncoso O.P., Pisani A., Gatto F., Bardi G. (2019). Natural polysaccharide nanomaterials: an overview of their immunological properties. *Int. J. Mol. Sci.*, **20**, Article number 5092, 22 p. <https://doi.org/10.3390/ijms20205092>
- Ullah S., Khalil A.A., Shaikat F., Song Yu. (2019). Sources, extraction and biomedical properties of polysaccharides. *Foods*, **8**, Article number 304, 23 p. <https://doi.org/10.3390/foods8080304>
- Varma A.J., Deshpande S.V., Kennedy J.F. (2004). Metal complexation by chitosan and its derivative: a review. *Carbohydr. Polym.*, **55**, 77–93.
- Vasil'chuk T.A., Linnik P.N. (1998). Carbohydrates in water of the Dnieper reservoirs. *Hydrobiol. J.*, **34**(2–3), 212–218.
- Wang X., Cai Y., Guo L. (2013). Variations in abundance and size distribution of carbohydrates in the lower Mississippi River, Pearl River and Bay of St Louis. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, **126**, 61–69.
- Wang X.Y., Zhang D.D., Yin J.Y., Nie S.P., Xie M.Y. (2019). Recent developments in Hericium erinaceus polysaccharides: extraction, purification, structural characteristics and biological activities. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, **59**(1), S96–S115.
- Yadav H., Karthikeyan Ch. (2019). Natural polysaccharides: structural features and properties. *Polysaccharide carriers for drug delivery*. Elsevier Ltd., 1–17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102553-6.00001-5>
- Zalloum H.M., Mubarak M.S. (2013). Chitosan and chitosan derivatives as chelating agents. In Thomas S., Ninan N., Mohan S., Francis E. (Eds.), *Natural polymers, biopolymers, biomaterials, and their composites, blends, and IPNs* (Chapter 1, 1–14). Toronto, New Jersey: Apple Academic Press.
- Zeppenfeld S., van Pinxteren M., Engel A., Herrmann H. (2020). A protocol for quantifying mono- and polysaccharides in seawater and related saline matrices by electro-dialysis (ED) — combined with HPAEC-PAD. *Ocean Sci.*, **16**, 817–830. <https://doi.org/10.5194/os-16-817-2020>
- Zhang Y.-P., Yang G.-P., Lu X.-L., Ding H.-B., Zhang H.-H. (2013). Distributions of dissolved monosaccharides and polysaccharides in the surface microlayer and surface water of the Jiaozhou Bay and its adjacent area. *Contin. Shelf Res.*, **63**, 85–93.
- Akiyama T. (1972). Chemical composition and molecular weight distribution of dissolved organic matter produced by bacterial degradation of green algae. *Geochem. J.*, **6**, 93–104.
- Alberts J.J. (1988). Dissolved carbohydrate distribution and dynamics in two southeastern United States reservoirs. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **45**, 325–332.
- Al-Hazmi H.E., Łuczak J., Habibzadeh S., Hasanin M.S., Mohammadi A., Esmaeili A., Kim S.-J., Yazdi M.K., Rabiee N., Badawi M., Saeb M.R. (2024). Polysaccharide nanocomposites in wastewater treatment: a review. *Chemosphere*, **347**, Article number 140578, 17 p. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140578>
- Aquatic ecosystems: interactivity of dissolved organic matter. (2003). Ed. by S.E.G. Findlay & R.L. Sinsabaugh. San Diego: Academic Press.
- Arata P.X., Alberghina J., Confalonieri V., Errea M.I., Estevez J.M., Ciancia M. (2017). Sulfated polysaccharides in the freshwater green macroalga *Cladophora surera* not linked to salinity adaptation. *Front. Plant Sci.*, **8**, Article number 1927, 10 p. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01927>
- Benalaya I., Alves G., Lopes J., Silva L.R. (2024). A review of natural polysaccharides: sources, characteristics, properties, food, and pharmaceutical applications. *Int. J. Mol. Sci.*, **25**, Article number 1322, 32 p. <https://doi.org/10.3390/ijms25021322>
- Biersmith A., Benner R. (1998). Carbohydrates in phytoplankton and freshly produced dissolved organic matter. *Mar. Chem.*, **63**, 131–144.
- Boughanmi R., Oelmann M., Steinbach C., Schwarz S. (2025). Sustainable polyelectrolyte complexes of pectin and chitosan as adsorbents for heavy metal ions from surface water. *J. Polym. Sci.*, **63**, 133–145.
- Cho E., Jung S. (2015). Supramolecular complexation of carbohydrates for the bioavailability enhancement of poorly soluble drugs. *Molecules*, **20**, 19620–19646. <https://doi.org/10.3390/molecules201019620>
- Chróst R.J., Münster U., Rai H., Albrecht D., Witzel P.K., Overbeck J. (1989). Photosynthetic production and exoenzymatic degradation of organic matter in the euphotic zone of a eutrophic lake. *J. Plankton Res.*, **11**(2), 223–242.
- Ciani M., Lepore G.O., Puri A., Facchetti G., Adessi A. (2025). Exploring metal interactions with released polysaccharides from *Cyanospora* sp. CE4: a chemical and spectroscopic study on biosorption mechanism. *Polymers*, **17**, Article number 371, 17 p. <https://doi.org/10.3390/polym17030371>
- Crini G., Morcellet M. (2002). Synthesis and applications of adsorbents containing cyclodextrins. *J. Sep. Sci.*, **25**, 789–813.
- D'Ayala G.G., Malinconico M., Laurienzo P. (2008). Marine derived polysaccharides for biomedical applications: chemical modification approaches. *Molecules*, **13**, 2069–2106.
- Dantas-Santos N., Gomes D.L., Costa L.S., Cordeiro S.L., Costa M.S.S.P., Trindade E.S., Franco C.R.Ch., Scortecchi K.C., Leite E.L., Rocha H.A.O. (2012). Freshwater plants synthesize sulfated polysaccharides: heterogalactans from water hyacinth

- (*Eicchornia crassipes*). *Int. J. Mol. Sci.*, **13**, 961–976. <https://doi.org/10.3390/ijms13010961>
- Dumitriu S. (2005). Polysaccharides: structural diversity and functional versatility (2<sup>nd</sup> ed.). Marcel Dekker, New York, NY, USA. ISBN 0-8247-5480-8.
- Gerente C., Lee V.K.C., Le Cloirec P., McKay G. (2007). Application of chitosan for the removal of metals from wastewaters by adsorption — mechanisms and models review. *Crit. Rev. Env. Sci. Tec.*, **37**(1), 41–127.
- Gouvêa S.P., Vieira A.A.H., Lombardi A.T. (2005). Copper and cadmium complexation by high molecular weight materials of dominant microalgae and of water from a eutrophic reservoir. *Chemosphere*, **60**, 1332–1339.
- Gremm T.J. (1997). Dissolved carbohydrates in streamwater determined by HPLC and pulsed amperometric detection. *Limnol. Oceanogr.*, **42**(2), 385–393.
- Gueguen C., Guo L., Wang D., et al. (2006). Chemical characteristic and origin of dissolved organic matter in the Yukon River. *Biogeochem.*, **77**, 139–155.
- Haiber S., Herzog H., Burba P., Gosciniaik B., Lambert J. (2001). Quantification of carbohydrate structures in size fractionated aquatic humic substances by two-dimensional nuclear magnetic resonance. *Fresenius J. Anal. Chem.*, **369**, 457–460.
- Hung C.C., Warnken K.W., Santschi P.H. (2005). A seasonal survey of carbohydrates and uronic acids in the Trinity River, Texas. *Org. Geochem.*, **36**, 463–474.
- Iddrisu L., Danso F., Cheong K.-L., Fang Z., Zhong S. (2024). Polysaccharides as protective agents against heavy metal toxicity. *Foods*, **13**, Article number 853, 27 p. <https://doi.org/10.3390/foods13060853>
- Jing Y., Zhang S., Li M., Zhang R., Zhang H., Zheng Y., Zhang D., Wu L. (2022). Structural characterization and biological activities of polysaccharide iron complex synthesized by plant polysaccharides: a review. *Front. Nutr.*, **9**, Article number 1013067, 17 p. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1013067>
- Joly N., Ghemati D., Aliouche D., Martin P. (2020). Interaction of metal ions with mono- and polysaccharides for wastewater treatment: a review. *Nat. Prod. Chem. Res.*, **8**(3), Article number 373, 17 p. <https://doi.org/10.35248/2329-6836.20.8.373>
- Jørgensen N.O.G. (2009). Carbohydrates. In: Likens G.E. (Ed.), *Encyclopedia of inland waters*, **2**, 727–742. Oxford: Elsevier.
- Kaplan D., Christiaen D., Arad S.M. (1988). Binding of heavy metals by algal polysaccharides. In: Stadler, T., Mollion, J., Christiaen, D. (Eds.), *Algal Biotechnology*, 179–187. New York, USA: Elsevier Applied Sciences.
- Khilchevskiy, V.K. (2022). Hydrochemical dictionary. Kyiv: DIA. [in Ukrainian]
- Khodse V.B., Bhosle N.B., Matondkar S.G.P. (2010). Distribution of dissolved carbohydrates and uronic acids in a tropical estuary, India. *J. Earth Syst. Sci.*, **119**(4), 519–530.
- Koivula N., Hänninen K. (2001). Concentrations of monosaccharides in humic substances in the early stages of humification. *Chemosphere*, **44**, 271–279.
- Krishnapriya K.R., Kandaswamy M. (2010). A new chitosan biopolymer derivative as metal-complexing agent: Synthesis, characterization, and metal (II) ion adsorption studies. *Carbohydr. Res.*, **345**(14), 2013–2022.
- Li X., Jiang F., Liu M., Qu Y., Lan Z., Dai X., Huang C., Yue X., Zhao S., Pan X., Zhang C. (2022). Synthesis, characterization, and bioactivities of polysaccharide metal complexes: a review. *J. Agric. Food Chem.*, **70**, 6922–6942.
- Linnik P.M. (2020). Role of organic substances-exometabolites in migration and detoxification of metals in surface waters (a review). *Hydrobiol. J.*, **56**(5), 92–109.
- Linnik P.N., Ivanechko Ya.S. (2014). Dissolved carbohydrates in the surface water bodies of Ukraine. *Hydrobiol. J.*, **50**(6), 87–107.
- Linnik P.N., Zhezherya V.A., Ivanechko Ya.S., Linnik R.P. (2014). Humic substances and their role in migration of metals in the high colored surface waters: the case study of rivers of the Pripjat' River basin. *Russ. J. Gen. Chem.*, **84**(13), 2572–2587.
- Loaëc M., Olier R., Guezennec J. (1997). Uptake of lead, cadmium and zinc by a novel bacterial exopolysaccharide. *Wat. Res.*, **31**(5), 1171–1179.
- Lombardi A.T., Vieira A.A.H. (2000). Copper complexation by cyanophyta and chlorophyta exudates. *Phycologia*, **39**(2), 118–125.
- Lozovik, P.A., Efremova, T.A., Sabylyna, A.V. (2012). Carbohydrates and lipids in different types of water bodies in Karelia in summer 2011. In *Organic matter and biogenic elements in inland and marine waters: Proceedings of the V All-Russian Symposium with international participation (10–14 September 2012, Petrozavodsk, Russia)* (pp. 373–376). Petrozavodsk, Russia. [in Russian]
- Lynnyk P.M., Zhezherya V.A., Lynnyk R.P. (2019). Study of coexisting forms of chemical elements in natural surface waters as one of the priority directions in modern hydrochemistry. *Problems of Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, Kyiv: Nika-Center, 165–180. [in Ukrainian]
- Manual for chemical analysis of land surface waters (1977). Ed. by A.D. Semenov. Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]
- McKnight D.M., Morel F.M.M. (1979). Release of weak and strong copper-complexing agents by algae. *Limnol. Oceanogr.*, **24**(5), 823–837.
- Niaz K., Khan F., Shah M.A. (2020). Analysis of carbohydrates (monosaccharides, polysaccharides). In: *Recent Advances in Natural Products Analysis*, **Chapter 18**, 621–633. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00018-4>
- Nivedita Pujari S., Arun K. Shettar, Joy Hoskeri H. (2021). Applications of polysaccharides in nutrition and medicine. In: Inamuddin, Mohd Imran Ahamed, Rajender Boddula, Tariq Altalhi (Eds.), *Polysaccharides: properties and applications*, **Chapter 30**, 657–682. Scrivener Publishing LLC.
- Osadchyy V., Nabyvanets B., Linnik P., Osadcha N., Nabyvanets Yu. (2016). Processes determining surface water chemistry. Switzerland: Springer International Publishing.
- Pakulski J.D., Benner R. (1994). Abundance and distribution of carbohydrate in the ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **39**(4), 930–940.
- Patent 75995 Ukraine, IPC51 (2012.01) G 01 N 1/00. (2012). Modified bathometer-glass: inventor V.A. Zhezherya, owner Institute of Hydrobiology NAS of Ukraine. No. u201205246; filed 27.04.12; published 25.12.12, Bulletin No. 24. [in Ukrainian]
- Paulsen B.S., Aslaksen T. (1998). Extracellular polysaccharides from *Ankistrodesmus densus* (Chlorophyceae). *J. Phycol.*, **34**, 638–641.
- Pestov A., Bratskaya S. (2016). Chitosan and its derivatives as highly efficient polymer ligands. *Molecules*, **21**, Article number 330, 35 p. <https://doi.org/10.3390/molecules21030330>
- Sakevich, O.Y., Usenko, O.M. (2008). Allelopathy in hydroecosystems. Kyiv: Institute of Hydrobiology NAS of Ukraine. [in Ukrainian]
- Satoh Y., Shoji S., Satoh H., Takahashi M. (1987). Dissolved organic matter in colored water from mountain bog pools in Japan. I. Seasonal changes in the concentration and molecular weight distribution. *Arch. Hydrobiol.*, **110**, 589–603.
- Sharma A., Sharma P.K., Malviya R. (2020). Utilization of polysaccharides and their derivatives in the removal of metal ions: role and recent advancement. *Current Materials Science*, **13**, 15 p.
- State of water bodies in urbanized areas. Lakes of the Opechen system. (2023). Ed. by Dr. of Chemistry, Prof. P.M. Lynnyk. Kyiv: Institute of Hydrobiology NAS of Ukraine. [in Ukrainian]
- Steen A.D., Hamdan L.J., Arnosti C. (2008). Dynamics of dissolved carbohydrates in the Chesapeake Bay: Insights from enzyme

- activities, concentrations, and microbial metabolism. *Limnol. Oceanogr.*, **53**(3), 936–947.
- Striquer-Soares F., Chevolut L. (1996). Particulate and dissolved carbohydrates and proteins in Lobo Reservoir (Sao Paulo State, Brazil): relationships with phytoplankton. *J. Plankton Res.*, **18**(4), 521–537.
- Sutherland I.W. (2001). Biofilm exopolysaccharides: a strong and sticky framework. *Microbiology*, **147**, 3–9.
- Terzić S., Ahel M., Cauwet G., Malej A. (1998). Group-specific phytoplankton biomass/dissolved carbohydrate relationships in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic). *Hydrobiologia*, **363**, 191–205.
- Torres F.G., Troncoso O.P., Pisani A., Gatto F., Bardi G. (2019). Natural polysaccharide nanomaterials: an overview of their immunological properties. *Int. J. Mol. Sci.*, **20**, Article number 5092, 22 p. <https://doi.org/10.3390/ijms20205092>
- Ullah S., Khalil A.A., Shaikat F., Song Yu. (2019). Sources, extraction and biomedical properties of polysaccharides. *Foods*, **8**, Article number 304, 23 p. <https://doi.org/10.3390/foods8080304>
- Varma A.J., Deshpande S.V., Kennedy J.F. (2004). Metal complexation by chitosan and its derivative: a review. *Carbohydr. Polym.*, **55**, 77–93.
- Vasil'chuk T.A., Linnik P.N. (1998). Carbohydrates in water of the Dnieper reservoirs. *Hydrobiol. J.*, **34**(2–3), 212–218.
- Wang X., Cai Y., Guo L. (2013). Variations in abundance and size distribution of carbohydrates in the lower Mississippi River, Pearl River and Bay of St Louis. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, **126**, 61–69.
- Wang X.Y., Zhang D.D., Yin J.Y., Nie S.P., Xie M.Y. (2019). Recent developments in Hericium erinaceus polysaccharides: extraction, purification, structural characteristics and biological activities. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, **59**(1), S96–S115.
- Yadav H., Karthikeyan Ch. (2019). Natural polysaccharides: structural features and properties. *Polysaccharide carriers for drug delivery*. Elsevier Ltd., 1–17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102553-6.00001-5>
- Zalloum H.M., Mubarak M.S. (2013). Chitosan and chitosan derivatives as chelating agents. In Thomas S., Ninan N., Mohan S., Francis E. (Eds.), *Natural polymers, biopolymers, biomaterials, and their composites, blends, and IPNs* (Chapter 1, 1–14). Toronto, New Jersey: Apple Academic Press.
- Zeppenfeld S., van Pinxteren M., Engel A., Herrmann H. (2020). A protocol for quantifying mono- and polysaccharides in seawater and related saline matrices by electro-dialysis (ED) — combined with HPAEC-PAD. *Ocean Sci.*, **16**, 817–830. <https://doi.org/10.5194/os-16-817-2020>
- Zhang Y.-P., Yang G.-P., Lu X.-L., Ding H.-B., Zhang H.-H. (2013). Distributions of dissolved monosaccharides and polysaccharides in the surface microlayer and surface water of the Jiaozhou Bay and its adjacent area. *Contin. Shelf Res.*, **63**, 85–93.

## CARBOHYDRATES AS AN IMPORTANT COMPONENT OF NATURAL ORGANIC SUBSTANCES IN SURFACE WATERS

Petro Linnik<sup>1</sup>

ORCID 0000-0002-2144-4052

e-mail: peter-linnik@ukr.net

Vladyslav Zhezherya<sup>1,2</sup>

ORCID 0000-0002-1128-5270

e-mail: zhezheryava1981@gmail.com

<sup>1</sup> Institute of Hydrobiology,  
National Academy of Sciences of Ukraine

<sup>2</sup> Ukrainian Hydrometeorological Institute  
of the State Emergency Service of Ukraine and  
National Academy of Sciences of Ukraine

Results of long-term studies on dissolved carbohydrates in various surface water bodies in Ukraine (lakes, rivers, and reservoirs) are presented. Dissolved carbohydrates are the second most abundant natural organic compounds after humic substances. Their concentrations vary widely, ranging from 0.19 to 5.43 mg/L (as glucose), and their contribution to total organic carbon (Corg) ranges from 2.2 to 36.1% (on average 4.7–16.4% Corg). Concentrations largely depend on the type of water

body and its trophic status, as well as on the development of phytoplankton and higher aquatic vegetation, which are the primary sources of carbohydrates. Maximum concentrations are observed in small, urbanized water bodies with significant anthropogenic impact and high nutrient content. Most of these are highly eutrophic water bodies, where phytoplankton and higher aquatic vegetation develop intensively. This explains the high concentrations of carbohydrates. The maximum concentration of dissolved carbohydrates is observed during the summer–autumn season. According to gel chromatography studies, dissolved carbohydrates are represented by compounds with a wide molecular weight range — from <1.0 to >70.0 kDa. Polysaccharides dominate, constituting on average 67.7–83.7% of the total dissolved carbohydrate content. This is likely due to the predominance of polymeric compounds released actively by algae. Low-molecular-weight compounds (<1.0 kDa) account for 16.3–32.3%. Seasonal variations of low-molecular-weight carbohydrates are discussed. The greatest transformation of high-molecular-weight carbohydrate fractions occurs in summer, when water temperature rises and internal water processes are activated, particularly with the participation of microflora.

**Keywords:** carbohydrates, monosaccharides, polysaccharides, dissolved organic substances, surface water bodies, urbanized area.



**Д.В. Рудаков<sup>1</sup>**ORCID 0000-0001-7878-8692  
rudakov.d.v@nmu.one**О.В. Чехун<sup>2</sup>**

info@dovr.gov.ua

**Ю.М. Битько<sup>1</sup>**ORCID 0009-0006-1877-9587  
bytko.y.m@nmu.one<sup>1</sup> Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"<sup>2</sup> Регіональний офіс водних ресурсів у Дніпропетровській області

## ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОДНО-СОЛЬОВОГО РЕЖИМУ Р. ІНГУЛЕЦЬ В ЗОНІ ТЕХНОГЕНЕЗУ ЗА ДАНИМИ ГІДРОХІМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Необхідність подачі води належної якості споживачам на півдні Дніпропетровської області та води для зрошення у Херсонській та Миколаївській областях вимагає ретельного вивчення особливостей водно-сольового режиму техногенно найбільш навантаженої ділянки р. Інгулець, що є метою даної роботи. На відміну від попередніх досліджень цієї ділянки р. Інгулець, які оперували насамперед із осередкованими концентраціями у річковій воді та багаторічними трендами, проведено аналіз даних державного моніторингу вод із частотою раз на 1–3 місяці з залученням даних про щоденні витрати води у двох створах протягом 6 років, результатів супутникового моніторингу для дослідження водно-сольового режиму ділянки р. Інгулець довжиною близько 70 км між греблею Карачунівського водосховища та с. Андріївка. Детально досліджено 22 короткі періоди у 2014–2019 рр., для яких ідентифіковано витрати р. Інгулець, вміст аніонів у воді у верхньому та нижньому створах ділянки річки. Статистичним аналізом та за допомогою рівнянь водного і сольового балансу оцінені чинники техногенного та природного впливу на витрату р. Інгулець та збільшення вмісту солей у річковій воді. Встановлено зростання вмісту аніонів у річковій воді після проходження досліджуваної ділянки в періоди без організованих скидань шахтних вод майже у 1,5 рази, що дає кількісну оцінку техногенного впливу на гідрогеохімічний режим у розглянутій частині долини р. Інгулець. Частка хлоридів у річковій воді зростає після проходження води через цю ділянку в середньому з 20–22% до 38% у періоди без скидань шахтних вод та 68% у періоди скидань зі ставка-накопичувача шахтних вод. Практичне значення результатів визначається кількісною оцінкою втрат води та змін її якості у разі використання цієї ділянки русла р. Інгулець для транспортування прісної води до південних районів Дніпропетровської області, водопостачання яких було порушено внаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС.

**Ключові слова:** водно-сольовий режим, техногенний вплив, витрата річки, підземний стік, вміст аніонів.

### ВСТУП

Підвищення солоності річок визначається в останні роки як загальносвітовий тренд (Bolotin et al., 2023), який викликаний, серед інших причин, зростанням посушливості клімату (Perri et al., 2020), інтенсивним внесенням добрив в агропромисловості та гірничим видобутком (Mitko et al., 2024; Winde & Newman-Portela, 2026). Найінтенсивніші прояви цих процесів в Україні характерні для басейнів річок Самара та Інгулець, куди скидаються шахтні води гірничодобувних підприємств Західного Донбасу та Кривбасу (GlZ-Україна, 2017; Sherstiuk et al. 2023). Зокрема, в басейні р. Самара в умовах зростання середньорічної температури повітря (Степаненко та ін., 2015; Сніжко та ін., 2021) слід очікувати зменшення витрати води в річці (Рудаков & Битько, 2025), що сприятиме зростанню її мінералізації. На цьому тлі оптимізація скиду шахтних вод із урахуванням гідрографа та місткості ставків-накопичувачів допоможе мінімізувати зростання мінералізації в річковій воді після протікання через зону вуглевидобутку (Rudakov et al., 2024).

На відміну від р. Самари течія р. Інгульця регулюється більшою мірою, а середня частина басейну, насамперед у межах м. Кривий Ріг, перебуває під більшим техногенним впливом. Значення р. Інгулець зросло після руйнування греблі Каховської ГЕС у 2023 р., яке поставило під загрозу водопостачання населення та промисловості правобережної частини Дніпропетровської області, включаючи міста Марганець, Нікополь, Покров (Суспільне Дніпро, 2024). Термінові заходи зі стабілізації водопостачання, які включали будівництво водогону до названих міст, що проводилися у 2023–2025 рр., включали транзит води з Карачунівського водосховища через річище Інгульця (Район Каховка, 2024). Цей шлях вже використовується протягом останніх десятиліть також і для подання води для потреб сільськогосподарського виробництва в Миколаївській та Херсонській областях (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 листопада 2013 року № 893-р). Значна частина русла р. Інгулець у межах Дніпропетровської області перетинає техногенно навантажену територію Кривбасу, а витрата річки контролюється

греблю Карачунівського водосховища, внаслідок чого гідрологічний режим цієї річки став зарегульованим. На нього впливають організовані скидання шахтних вод у холодний період року, промивання річища навесні, подача води для зрошення у літній період. Певний вплив мають також хвостосховища, відстійники шахтних вод, регульована витрата р. Саксагань, де створені водосховища.

Надійне водопостачання населення, промисловості та сільського господарства стає особливо актуальним в умовах посушливішого клімату на півдні країни внаслідок зростання температури повітря (Степаненко та ін., 2015; Сніжко та ін., 2021). За таких умов якість води, яка подається для побутових та господарських потреб і зрошення, має залишатися прийнятною.

Однак внаслідок техногенного впливу гірничодобувних підприємств Кривбасу, що знаходяться в басейні р. Інгулець, мінералізація річкової води помітно зростає на ділянці довжиною близько 70 км від водомірного пункту біля греблі Карачунівського водосховища у м. Кривий Ріг до с. Андріївка нижче за течією від Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату (ГЗК). Це погіршує якість води, що в умовах її системного використання для зрошення негативно впливає на стан зрошуваних земель.

Процеси перенесення солей в басейні р. Інгулець вивчалися у попередніх дослідженнях, присвячених аналізу гідрогеохімічного режиму в Кривбасі (Шерстюк & Хільчевський, 2012), у тому числі з використанням гідрогеологічних моделей регіонального масштабу (Багрій та ін., 2005). У 2016–2017 рр. у рамках міжнародного проєкту з оптимізації скидання та утилізації надлишку шахтних вод була створена гідравлічна та гідрохімічна модель досліджуваної ділянки р. Інгулець (GlZ-Україна..., 2017). Однак підземний стік у цій моделі не враховувався. Згадані дослідження базувалися на даних спостережень до 2015 р. Зауважимо, що з того часу відбувалися певні зміни гідрохімічного режиму річки, пов'язані як із техногенним впливом, включаючи пошкодження греблі Карачунівського водосховища у вересні 2022 р. внаслідок влучання російських ракет і тимчасового, на тиждень, зростання витрати, так і з впливом природних, у тому числі кліматичних факторів.

Поглиблення розуміння щодо змін гідрологічних та гідрохімічних показників потребує ширшого залучення даних моніторингу, які накопичувалися протягом останніх років, включаючи щодобові значення витрат, рівнів, щомісячні вимірювання вмісту аніонів та деяких інших речовин. Аналіз закономірностей гідрологічного та гідрохімічного режиму на розглянутій техногенно-навантаженій

ділянці дозволить оптимізувати заходи водорегулювання та водозабезпечення з метою підтримки якості річкових вод і створення умов для переходу в майбутньому до стійкого водного господарювання у басейні р. Інгулець.

Для дослідження річкових систем, що перебувають під техногенним впливом, використовують різні типи моделей, від балансових до нестационарних тривимірних (Hocking & Bailey, 2022; Wang et al. 2022). Але обґрунтування та розробка моделей таких річкових систем потребують попереднього аналізу даних моніторингу, який дозволить коректно обрати концептуальну схему для розрахунків та виявити найважливіші тренди еволюції параметрів гідрохімічного режиму в часі. У попередніх дослідженнях техногенно навантаженої ділянки р. Інгулець визначалися та аналізувалися, як правило, концентрації у річковій воді, осереднені за певні періоди часу. На відміну від цього, у представленій роботі проведено аналіз часових рядів елементів хімічного складу води за даними державного моніторингу вод із частотою раз на 1–3 місяці, залучено дані про щоденні витрати води у двох створах протягом шести років, та дані супутникового моніторингу. Це дозволяє деталізувати часовий масштаб розгляду водно-сольового режиму річки і закономірності змін хімічного складу. У цьому полягає новизна представленого дослідження.

**Метою цієї роботи** є оцінка параметрів та закономірностей водно-сольового режиму та сольового балансу найбільш техногенно навантаженої ділянки р. Інгулець між Карачунівським водосховищем та с. Андріївка за даними моніторингу витрат води та хімічного складу, найбільш детальними на даний час.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Проведений кількісний аналіз спирається на дані гідрохімічного моніторингу, що проводиться Державним агентством водних ресурсів (ДАВР) України (Державне агентство водних ресурсів України, 2026), щоденних спостережень за витратами й рівнем води р. Інгулець на водомірному пункті в с. Андріївка. З 25.04.2016 р. дані щодо рівня води на водомірних пунктах на р. Інгулець доступні на платформі супутникових даних Copernicus. Крім того, використано дані про опади та температуру повітря (NASA, 2025) і показники гідрологічного режиму наведені в роботі (Хільчевський та ін., 2007). Для верхнього створу ділянки греблі Карачунівського водосховища використовувалися дані міської станції комунального підприємства, а для нижнього створу біля с. Андріївка — дані ДАВР України.

Географічно досліджувана ділянка знаходиться між водомірними пунктами нижче греблі Карачунівського водосховища та біля с. Андріївка (рис. 1).

Уздовж ділянки річища довжиною близько 70 км розташовані кар'єри № 2-біс, № 3-біс, Південного та Інгулецького ГЗК, хвостосховища Центрального і Південного ГЗК, ставок-накопичувач у б. Свистунова на південний схід від м. Кривий Ріг.

Період, для якого аналізувалися складові сольового балансу, охоплює 12.02.2014–13.12.2019 рр., протягом якого відомі дані щодо вмісту аніонів,

БСК<sub>5</sub>, завислих речовин, кисня розчиненого (не частіше раз на місяць), та щодобові відомості про рівні та витрату води на верхньому та нижньому створі даної ділянки. Між цими пунктами у місці впадіння р. Саксагань до р. Інгулець знаходиться також пункт державного моніторингу вод, дані з якого (Державне агентство водних ресурсів України, 2026) наводяться лише з початку 2024 р. Наявні дані спостережень аналізувалися методами статистики, а також методом водного й сольового балансу.

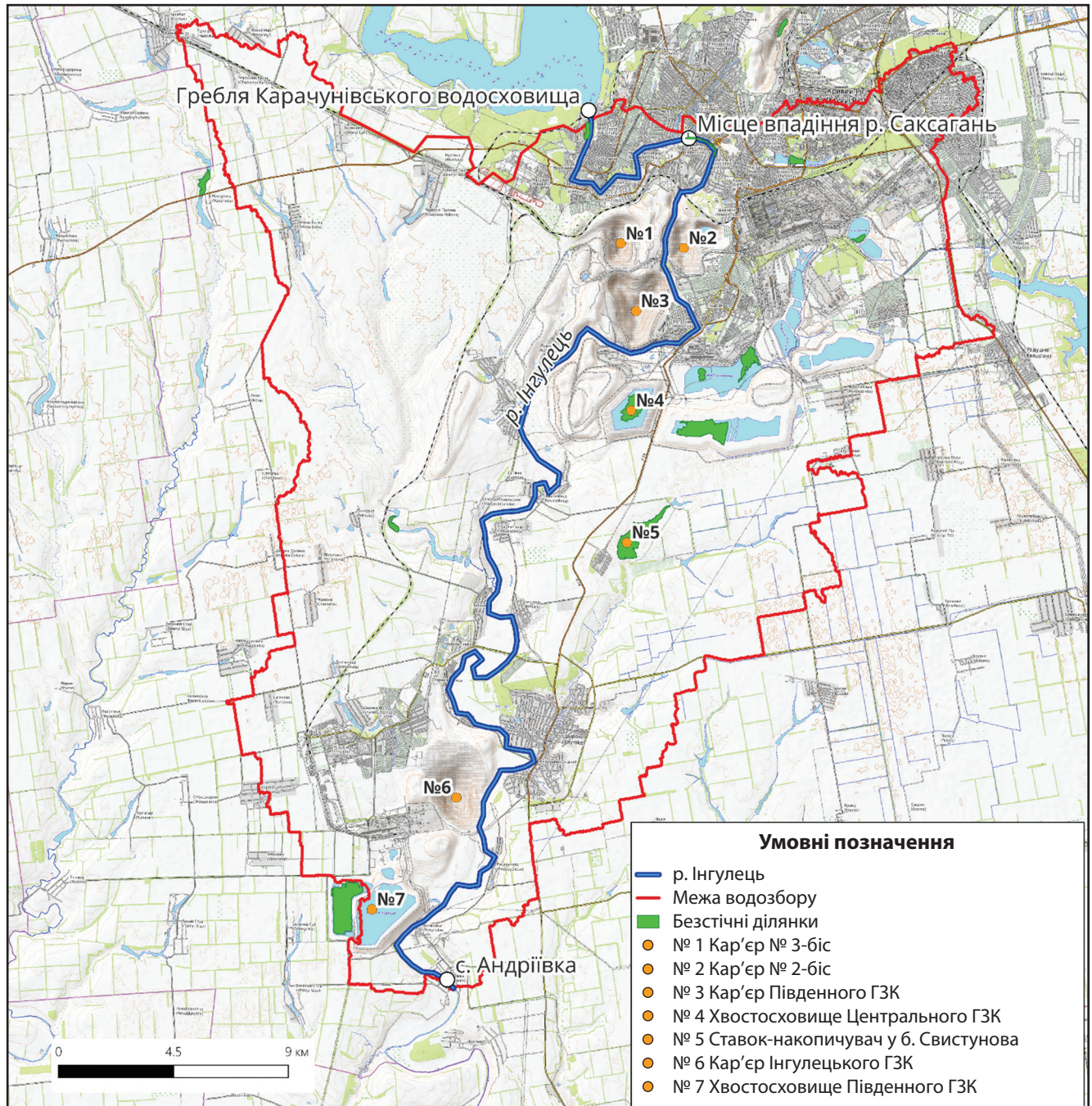


Рис. 1. Географічне положення досліджуваної частини басейну р. Інгулець

Статистичний аналіз виконувався перевіркою рівності середніх значень за критерієм Стьюдента та розрахунками коефіцієнта кореляції. Ці результати можна вважати значущими на рівні довірчої ймовірності 0,95.

Зміна витрати річки на розглянутій ділянці  $\Delta Q_{01}$  визначається з рівняння водного балансу за проміжок часу  $\Delta t$ , яке можна записати у вигляді:

$$\Delta Q_{01} = Q_1 - Q_0 = Q_t + Q_s + Q_{sr} + Q_{gw} + Q_{pr} - Q_{ev} - Q_p - Q_m - Q_{ac}, \quad (1)$$

де  $Q_0$  і  $Q_1$  — витрата води в річці у верхньому та нижньому створі ділянки;  $Q_t$  — сумарний підземний стік до річки з хвостосховищ та ставків-накопичувачів у зоні їх впливу;  $Q_s$  — витрата р. Саксагань у місці її впадіння в р. Інгулець;  $Q_{sr}$  — витрата поверхневого стоку на ділянці річки;  $Q_{gw}$  — витрата природного підземного стоку поза межами впливу техногенних об'єктів;  $Q_{pr}$  і  $Q_{ev}$  — об'єми атмосферних опадів і випаровування із водної поверхні на ділянці річки за одиницю часу;  $Q_p$  та  $Q_m$  — сумарні припливи з річки до кар'єрів та підземних виробок шахт через дно річки;  $Q_{ac}$  — витрата на акумуляцію води у руслі в теплий період року. Всі доданки мають розмірність  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Зміна потоку солей  $\Delta q_{01}$  на розглянутій ділянці визначається із рівняння балансу солей для ділянки річки між верхнім створом із індексом "0" (водомірний пункт біля греблі Карачунівського водосховища) та нижнім створом із індексом "1" (водомірний пункт у с. Андріївка) протягом періоду часу  $\Delta t$  описується рівнянням:

$$\Delta q_{01} = q_t + q_s + q_{sr} + q_{gw} - q_p - q_m, \quad (2)$$

де  $q_t$  — надходження солей із хвостосховищ та ставків-накопичувачів у зоні їх впливу в долині річки;  $q_s$  — надходження солей із річки Саксагань;  $q_{sr}$  — надходження солей із поверхневим стоком;  $q_{gw}$  — надходження солей із природним підземним стоком на ділянках поза межами впливу хвостосховищ;  $q_p$  — потік солей до кар'єрів;  $q_m$  — потік солей до підземних виробок шахт.

За умови достатнього перемішування солей у перерізі річки зміну потоку солей  $\Delta q_{01}$  можна оцінити за даними моніторингу за формулою:

$$\Delta q_{01} = Q_1 C_1 - Q_0 C_0, \quad (3)$$

де  $C_0$  і  $C_1$  — сума солей у річкової воді у верхньому та нижньому створі.

Члени рівняння (2) можна наближено розрахувати за формулами:

$$q_t = Q_t C_t, \quad q_s = Q_s C_s, \quad q_{sr} = Q_{sr} C_{sr}, \\ q_{gw} = Q_{gw} C_{gw}, \quad q_p = C_{av} Q_p, \quad q_m = C_{av} Q_m, \quad (4)$$

де  $C_t$  — середня мінералізація води, яка надходить до річки з цих об'єктів підземним стоком;  $C_{av}$  — середня мінералізація води на ділянках фільтрації до кар'єрів та підземних виробок. У першому наближенні за наявності спостережень у верхньому та нижньому створах ділянки річки можна прийняти  $C_{av} = (C_0 + C_1)/2$ ;  $C_s$  — мінералізація води р. Саксагань у місці її впадіння в р. Інгулець;  $C_{sr}$  — середня мінералізація води, яка надходить до річки з поверхневим стоком;  $C_{gw}$  — середня мінералізація води, яка надходить до річки з підземним стоком поза межами впливу техногенних об'єктів. Позначення для складових припливу у формулах (3) ті самі, що прийнято у рівнянні (1).

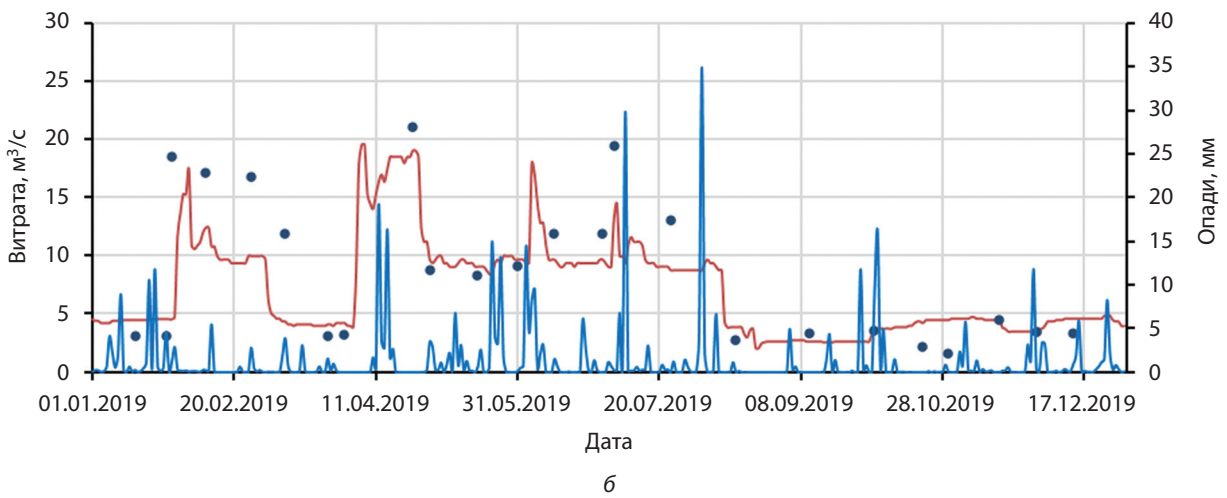
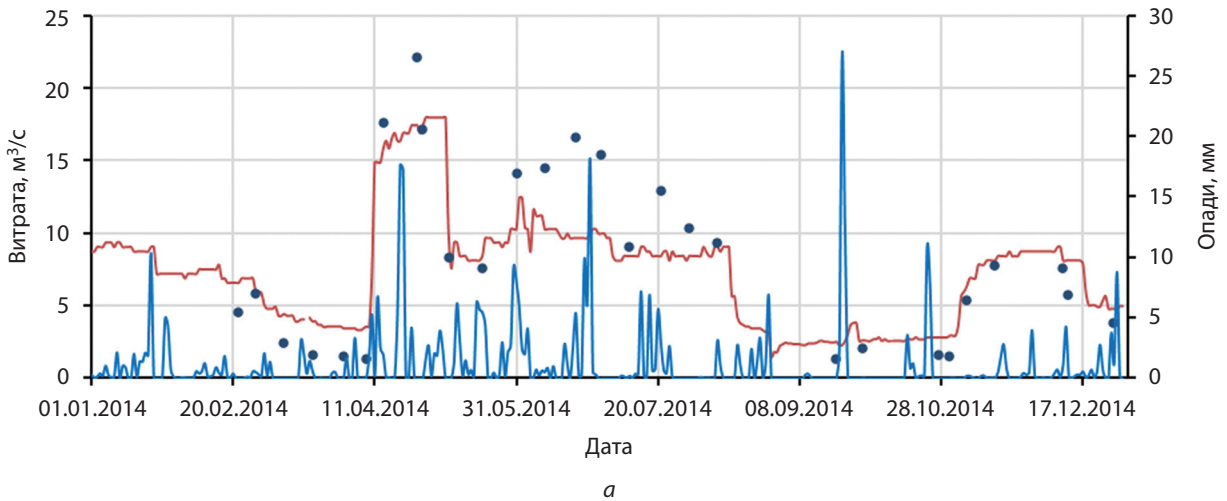
У загальному випадку визначення доданків, які входять до рівняння (1), потребує суміщеного гідрологічного та гідрогеологічного моделювання, що є досить складним завданням і часто не повністю забезпечено даними спостережень для верифікації розрахунків. З іншого боку, попередню оцінку складових водного балансу можна виконати для окремих інтервалів часу з майже одночасно вимірними значеннями витрат і компонентів хімічного складу води. Такий підхід дозволяє оцінювати реакцію річкової системи на зміну кліматичних та гідрологічних параметрів.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

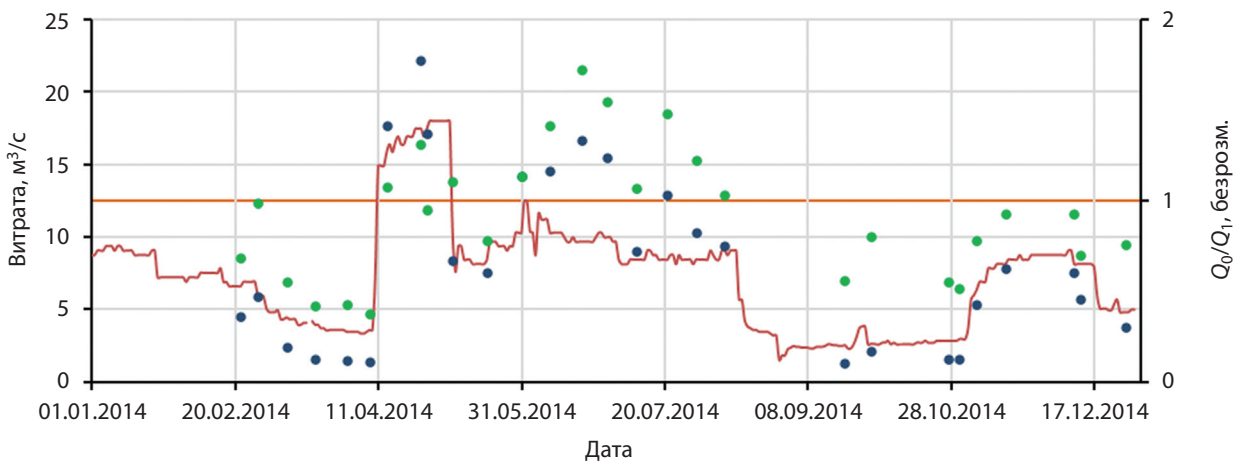
**Аналіз даних моніторингу.** Поверхневий стік не є першочерговим чинником формування витрати р. Інгулець на зазначеній ділянці, оскільки витрата річки несуттєво (переважно на 5–8%) зростає після випадіння атмосферних опадів (рис. 2). Ця закономірність спостерігається протягом 2014–2019 рр.

Відношення витрати води в річці у верхньому створі  $Q_{КВ}$  до витрати води у нижньому створі  $Q_{Анд}$  з досліджуваної ділянки може бути як більше, так і менше одиниці, навіть із урахуванням швидкості поширення хвиль попуску через греблю водосховища. Час досягнення води від верхнього створу до нижнього з урахуванням живого перерізу русла Інгульця шириною 20–50 м і глибиною 1,5–2 м можна оцінити від 1–2 діб для витрати у верхньому створі близько 20  $\text{м}^3/\text{с}$  до 4–7 діб для витрати 3–5  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Результати вимірювань протягом 2014 року з урахуванням такого зміщення у часі для розрахунку відношення  $\xi_Q = Q_0/Q_1$  (рис. 3) показують, що  $\xi_Q$ , як правило, не перевищує 1,0 у періоди скидання шахтних вод і у межень. Але протягом періоду промивання річища та подачі води на зрошення (квітень–серпень)  $\xi_Q > 1$ , тобто витрата на вході в ділянку перевищувала витрату на її виході, що відображено відповідними маркерами вище помаранчевої лінії. Перевищення початкової витрати



**Рис. 2.** Зміна витрати р. Інгулець біля греблі Карачунівського водосховища у м. Кривий Ріг ( $Q_0$  — сині точки, ліва вісь) та у с. Андріївка ( $Q_1$  — червона лінія, ліва вісь), та кількість опадів (синя лінія): а — у 2014 р.; б — у 2019 р.



**Рис. 3.** Зміна витрати р. Інгулець біля греблі Карачунівського водосховища у верхньому створі ( $Q_0$  — сині точки, ліва вісь) та у с. Андріївка ( $Q_1$  — червона лінія, ліва вісь), та відношення цих витрат ( $Q_0/Q_1$  зелені точки, права вісь) у 2014 р.

над витратою у кінцевому створі ділянки у періоди промивання та подачі води на зрошення в 2014 р. досягало в середньому  $2,97 \text{ м}^3/\text{с}$ , а максимально — майже  $7 \text{ м}^3/\text{с}$ . Ця закономірність зберігається в цілому й для 2015–2019 рр.

Найбільший внесок у тимчасове збільшення мінералізації вносять скиди шахтних вод зі ставка-накопичувача у балці Свистунова у холодну пору року (рис. 4). Такий режим скидання дозволяє мінімізувати вплив надмірного засолення на екологічний стан р. Інгулець і, після весняного промивання річища, досягти хімічного складу, прийняттого для подальшого зрошування.

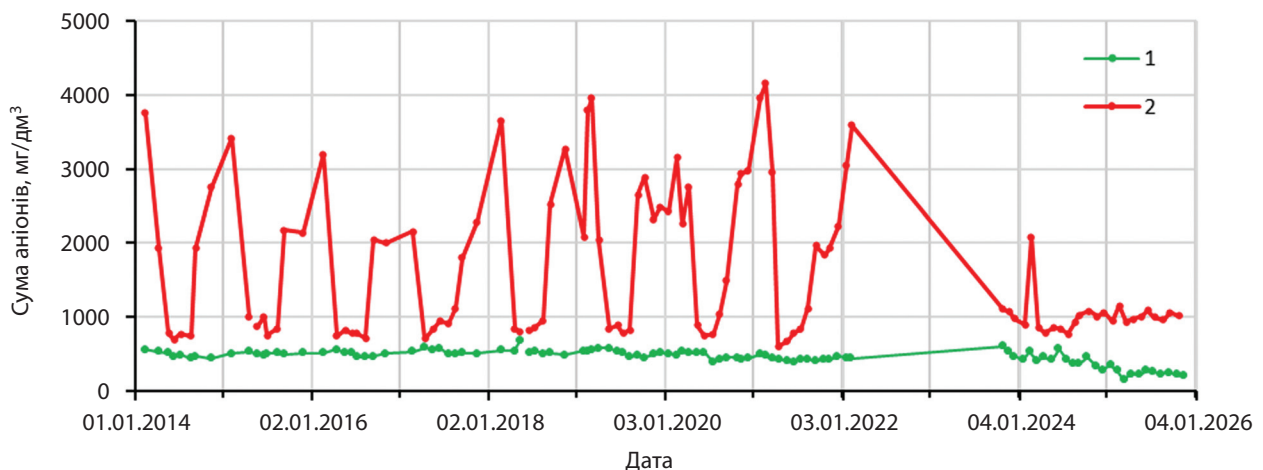
Порівняння часових рядів на рис. 4 за критерієм Стьюдента рівності середніх показує статистично значуще, з довірчою ймовірністю 0,999, перевищення суми аніонів у річковій воді у створі біля с. Андріївка порівняно з греблю Карачунівського водосховища, яке за даними 35 вимірів становить у середньому  $0,31 \text{ г}/\text{дм}^3$  у періоди між скиданням шахтних вод. Причинами такого зростання є надходження солей із водним стоком р. Саксагань, до якої потрапляють шахтні та рудничні води Північного та Центрального ГЗК, шламові води, що фільтруються з хвостосховищ неподалік від річища Інгульця, а також підземний стік до р. Інгулець із верхнього водоносного горизонту, який має вищу природну фонову мінералізацію порівняно з мінералізацією води у Карчунівському водосховищі навіть поза межами впливу хвостосховищ та ставка-накопичувача у балці Свистунова (Багрій та ін., 2005).

При цьому відбувається зміна хімічного складу річкових вод. У верхньому створі на водомірному пункті біля греблі Карачунівського водосховища частка хлоридів серед аніонів протягом розглянутого періоду залишалася практично стабільною:

20,7% у періоди між скидами шахтних вод і 22,4% в періоди скидань у холодний період. У нижньому створі біля с. Андріївка частка хлоридів у сумі аніонів була більшою і становила 38,0% у періоди між скиданнями шахтних вод і 68,3% — у періоди скидань. Таке зростання свідчить про надходження підземних вод зі підвищеним вмістом хлоридів над сульфатами на розглянутій ділянці, навіть за відсутності організованих скидів шахтних вод. Зауважимо, що через досить повільну міграцію солей з підземними водами порівняно зі стоком у річці слід очікувати збереження такої закономірності й після періоду 2014–2019 рр.

Вміст інших вимірюваних аніонів, крім фосфатів, суттєво збільшується після проходження води через досліджувану ділянку (табл. 1, рис. 5). Різниця між середніми значеннями аніонів у двох створах для всіх компонентів є статистично значущою за критерієм Стьюдента з довірчою ймовірністю 0,95, за винятком амоній-іонів для 2014–2025 рр. Техногенний вплив на якість води залишався потужним і тоді, коли скид шахтних вод зі ставка-накопичувача відсутній (2014–2019 рр.), при цьому вміст аніонів, крім фосфатів, зростав у діапазоні від 10 до 198%.

**Оцінювання складових водно-сольового балансу.** Дані гідрогеохімічного моніторингу ДАВР України (Державне агентство водних ресурсів України, 2026) містять відомості про вміст аніонів (амоній-іони, нітрати, нітроти, сульфати, фосфати, хлориди), причому вміст сульфатів та хлоридів становить у середньому 99,55% від умісту зазначених аніонів, коливаючись в діапазоні 96,78–99,84%. Зважаючи на наявність даних, далі розглядається вміст саме цих аніонів. Вміст гідрокарбонатів у даних моніторингу на сайті ДАВР не наводиться; за даними (Хільчев-



**Рис. 4.** Зміна суми аніонів за даними ДАВР України: 1 — біля греблі Карачунівського водосховища у верхньому створі біля греблі Карачунівського водосховища; 2 — у нижньому створі біля с. Андріївка

Таблиця 1. Зміна вмісту аніонів, БСК<sub>5</sub>, завислих речовин і розчиненого кисню у воді р. Інгулець на ділянці між верхнім створом біля греблі Карачунівського водосховища, ("0") та нижнім створом біля с. Андріївка ("1")

|  | Всі вимірювання за 2014–2025 рр. |                       | Вимірювання за 2014–2019 рр. у періоді між скидами шахтних вод |                       |
|--|----------------------------------|-----------------------|--|-----------------------|
|  | середнє значення у створі "0"    | зміна у створі "1", % | середнє значення у створі "0"                                  | зміна у створі "1", % |
| SO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>               | 360,37                           | 75,1                  | 394,42   | 24,9                  |
| Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>                             | 101,89                           | 851,3                 | 107,96   | 197,9                 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>                | 0,28                             | 7,6                   | 0,29   | 10,0                  |
| БСК <sub>5</sub> , мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>            | 2,55                             | 29,4                  | 2,62   | 42,5                  |
| Завислі речовини, мг/дм <sup>3</sup>                             | 6,74                             | 24,0                  | 7,20   | 43,4                  |
| O <sub>2</sub> розч., мг/дм <sup>3</sup>                         | 8,66                             | 6,7                   | 8,32   | 10,4                  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>                | 1,29                             | 177,1                 | 1,05   | 85,0                  |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>                | 0,05                             | 84,1                  | 0,04   | 65,1                  |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> та поліфосфати, мг/дм <sup>3</sup> | 0,27                             | -22,0                 | 0,22   | -28,1                 |

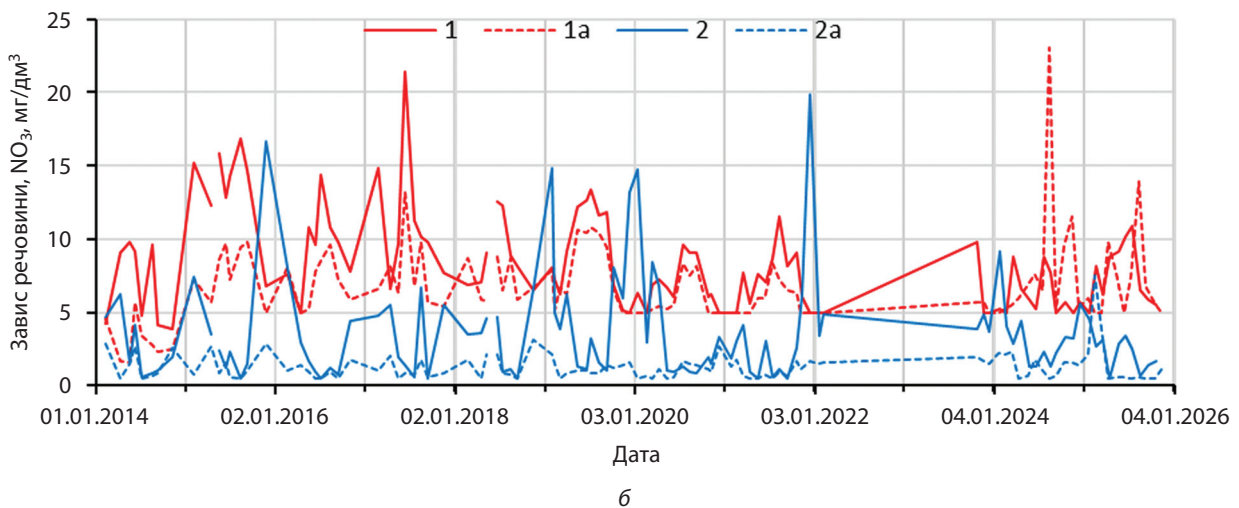
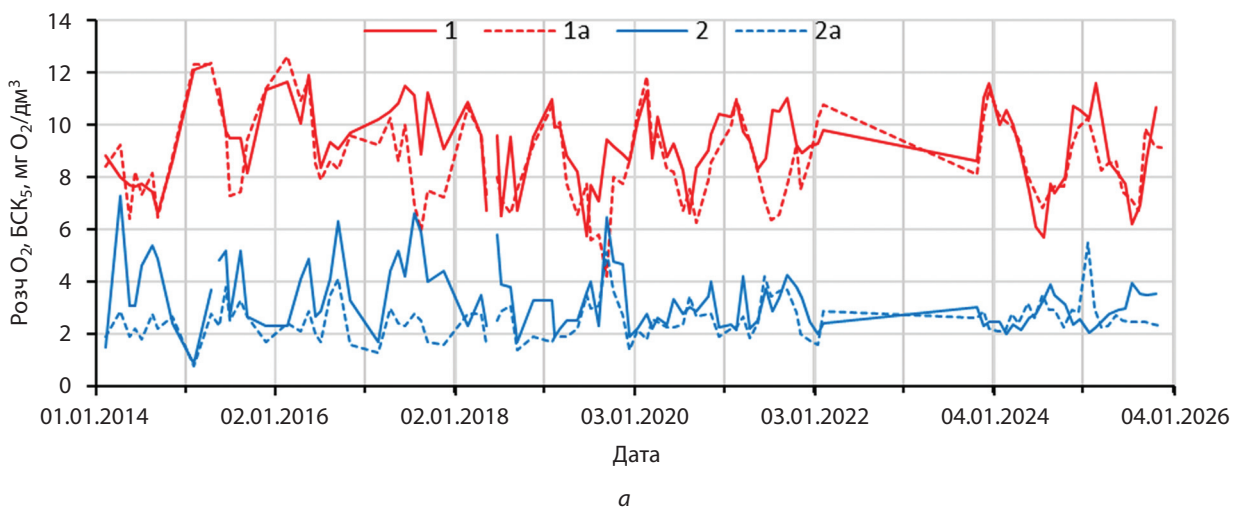


Рис. 5. Зміна компонентів хімічного складу води за даними ДАВР України: а — 1 і 1а — розчинений кисень, мг/дм<sup>3</sup>; 2 і 2а — БСК<sub>5</sub>, мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>; б — 1 і 1а — завислі речовини, мг/дм<sup>3</sup>; 2 і 2а — нітрат-іони, мг/дм<sup>3</sup>. Криві 1 і 2 відповідають нижньому створу біля с. Андріївка, 1а і 2а — верхньому створу біля греблі Карачунівського водосховища

ський та ін., 2012) за період 1998–2008 їх середній вміст становив у місці впадіння р. Саксагань до р. Інгулець 9,5–11,6% від суми сульфатів, хлоридів, та гідрокарбонатів.

Частина з припливів у формулах (1) і (4) є відносно стабільною і може бути оцінена за даними гідрогеологічних та гідрологічних досліджень. Сумарний приплив включає припливи до шахт і кар'єрів (№ 3-біс, № 2-біс, ПівдГЗК та Інгулецького ГЗК). Припливи до шахт ім. Валявко Північна і Південна невідомі, але їх можна вважати незначними, оскільки тривалий час вони знаходяться на "мокрій" консервації.

Приплив до кар'єру ІнгЗК за розглянутий період можна оцінити за фактичними даними, що наводяться у (Шерстюк, 2021): протягом 2017–2019 рр. вони становили близько 15000 м<sup>3</sup>/добу. Дані щодо припливів до кар'єрів № 3-біс, № 2-біс, ПівдГЗК за цей період відсутні, але з урахуванням меншого перепаду рівнів води й меншого гідравлічного градієнту є меншими, порівняно з тим, що надходить до кар'єру ІнгЗК. Отже, сумарний приплив до кар'єрів і шахт на розглянутій ділянці р. Інгулець  $Q_p + Q_m$  можна оцінити до 60000–70000 м<sup>3</sup>/добу (0,7–0,8 м<sup>3</sup>/с), який частково забезпечується фільтраційними втратами річки. Зазначимо, що втрати під час промивання річища та подачі води на зрошення влітку можуть зростати, але надійніші оцінки можна зробити лише з застосуванням нестационарних гідрологічних та гідрогеологічних моделей.

Втрата води внаслідок випаровування  $Q_{ev}$  розраховується за кліматичними даними (NASA, 2025), а швидкість випаровування — за формулою Пенмана (Linacre, 1977). Максимальні втрати води з річки на досліджуваній ділянці внаслідок випаровування оцінюються у 0,25 м<sup>3</sup>/с у спекотний день влітку. Збільшення витрати води внаслідок опадів, що безпосередньо випадають на водну поверхню річки  $Q_{pr}$ , розраховується пропорційно площі водної поверхні ділянки і сягає 0,27 м<sup>3</sup>/с для дня з найбільшою кількістю опадів серед розглянутих у *табл. 1* (12.06.2016 р.).

Поверхневий стік  $Q_{sr}$  можна визначити наближено за формулою:

$$Q_{sr} = SV_{pr}\xi/\Delta t, \quad (5)$$

де  $S$  — площа водозбору, з якої стік води з атмосферних опадів об'ємом  $V_{pr}$  за період  $\Delta t$  досягне річища;  $\xi$  — коефіцієнт стоку. Загальна водозбірна площа до створу біля с. Андріївка  $S$  за розрахунками в QGIS становить близько 785 км<sup>2</sup> (*рис. 1*), але фактична площа швидкого поверхневого стоку по пониженнях рельєфу з урахуванням кар'єрів як безстічних площ у долині річки менша. Коефіцієнт сто-

ку  $\xi$  приймається згідно (Хільчевський та ін., 2007) в діапазоні 0,1–0,15; точніші оцінки потребують детального аналізу поверхні в QGIS з використанням плагіну SAGA, зміни витрати після випадіння опадів у басейні річки з залученням кліматичних даних із урахуванням типу поверхні, наявності рослинного покриву тощо.

Техногенний приплив із хвостосховищ ЦГЗК і ПівдГЗК та ставка-накопичувача у б. Свистунова до р. Інгулець оцінено за законом Дарсі, враховуючи дані рельєфу місцевості і перепад висот рівня води в цих об'єктах і р. Інгулець, довжини ділянок цих об'єктів уздовж русла, усереднені значення потужності водоносного горизонту й фільтраційних властивостей порід. Припливи до русла через правий та лівий берег річки розраховуються окремо. Приплив із хвостосховищ  $Q_t$  уздовж ділянки русла р. Інгулець "296 км — 311 км" за даними натурних досліджень 2006–2007 рр. варіював у діапазоні 0,4–0,8 м<sup>3</sup>/добу; розрахунки дають оцінки від 0,25 до 0,5 м<sup>3</sup>/добу.

Приплив із р. Саксагань приймається за даними скидів із Саксаганського водосховища, розташованого неподалік від її впадіння до р. Інгулець. Для періодів, представлених у *табл. 2*, скиди з водосховища майже співпадали у часі зі скидами зі ставка-накопичувача у балку Свистунова, що сприяло збільшенню витрати на розглянутій ділянці р. Інгулець, зокрема 31.01.2015 р., 15.11.2018 р., 31.03.2019 р., 13.12.2019 р.

У періоди без організованого скидання шахтних вод та води з Саксаганського водосховища (світлі рядки в *табл. 2*), за відсутності опадів (за виключенням 18.05.2016 р.) відношення витрати у верхньому створі до витрати у нижньому створі  $\xi_Q = Q_0/Q_1$  перебувало в діапазоні від 1,0 до 1,41, і становило у середньому 1,2. Це свідчить про зменшення витрати р. Інгулець на цій ділянці в середньому на 17%. В абсолютних значеннях зменшення  $\Delta Q_{01}$  без урахування скидів із Саксаганського водосховища та ставка-накопичувача у б. Свистунова сягало 4,85 м<sup>3</sup>/с. Зі зростанням витрати  $Q_0$  значення  $\Delta Q_{01}$  збільшувалося. Коефіцієнт кореляції між  $Q_0$  та  $\Delta Q_{01}$  становив 0,44, що є статистично значущим на рівні довірчої ймовірності  $\alpha=0,9$ , однак втрачає значущість на більш строгому рівні  $\alpha=0,95$ . Деталізація цього зв'язку потребує побудови більш детальних гідрологічних моделей із охопленням інших періодів часу, у тому числі більшої тривалості.

У періоди без скидання шахтних вод (*табл. 2*) хімічний стік аніонів у р. Інгулець на досліджуваній ділянці зростав у середньому від 240,8 т/добу до 342,7 т/добу з середньоквадратичним відхиленням 208,9 т/добу, або на 42,3%. З урахуванням цього,

Таблиця 2. Розрахунок збільшення хімічного стоку аніонів, наведених у табл. 1, на ділянці р. Інгулець між створами у Кривому Розі біля греблі Карачунівського водосховища ("0") та біля с. Андріївка ("1")

| Витрата води Q <sub>0</sub> у верхньому створі (м <sup>3</sup> /с) |         | Витрата води Q <sub>1</sub> в нижньому створі (м <sup>3</sup> /с) |         | Опади, метеостанція м. Кривий Ріг, мм/добу | Сума аніонів, мг/дм <sup>3</sup> |          | Частка хлоридів, % |          | Хімічний стік аніонів q <sub>а</sub> т/доб |          | Збільшення хімічного стоку аніонів Δq <sub>а</sub> т/добу |        |
|--|---------|---|---------|--|----------------------------------|----------|--------------------|----------|--|----------|---|--------|
| дата   | витрата | дата  | витрата |  | стор "0"                         | стор "1" | стор "0"           | стор "1" | стор "0"                                   | стор "1" |   |        |
| 19.05.2014   | 7,53    | 20.05.2014  | 9,66    | 5,46                                       | 20.05.2014                       | 510,32   | 779,32             | 20,42    | 39,23                                      | 3,84     | 7,53  | 318,4  |
| 10.06.2014   | 14,50   | 11.06.2014  | 10,28   | 0,0  | 11.06.2014                       | 471,82   | 697,81             | 21,21    | 39,77                                      | 6,84     | 7,17  | 28,7   |
| 10.07.2014   | 9,00    | 11.07.2014  | 8,43    | 0,0  | 08.07.2014                       | 491,18   | 772,77             | 21,19    | 38,75                                      | 4,42     | 6,51  | 180,9  |
| 06.11.2014   | 5,35    | 07.11.2014  | 7,82    | 0,22                                       | 11.11.2014                       | 440,85   | 2751,79            | 28,63    | 80,52                                      | 2,36     | 21,52   | 1655,5 |
| 31.01.2015   | 5,45    | 31.01.2015  | 6,89    | 0,0  | 03.02.2015                       | 502,21   | 3415,45            | 21,18    | 80,97                                      | 2,74     | 23,53   | 1796,7 |
| 15.04.2015   | 20,10   | 16.04.2015  | 20,12   | 0,41                                       | 15.04.2015                       | 536,28   | 997,52             | 20,43    | 34,77                                      | 10,78    | 20,07   | 802,7  |
| 17.05.2015   | 11,70   | 17.05.2015  | 9,97    | 0,0  | 19.05.2015                       | 509,59   | 871,31             | 21,50    | 36,87                                      | 5,96     | 8,69  | 235,4  |
| 30.06.2015   | 17,90   | 01.07.2015  | 14,07   | 0,0  | 01.07.2015                       | 506,67   | 752,38             | 20,81    | 35,22                                      | 9,07     | 10,59   | 131,0  |
| 11.08.2015   | 8,45    | 12.08.2015  | 6,69    | 0,0  | 12.08.2015                       | 515,10   | 842,24             | 20,19    | 42,52                                      | 4,35     | 5,63  | 110,8  |
| 18.05.2016   | 8,20    | 19.05.2016  | 9,97    | 0,0  | 17.05.2016                       | 516,73   | 826,14             | 21,55    | 36,69                                      | 4,24     | 8,24  | 345,6  |
| 12.06.2016   | 9,18    | 13.06.2016  | 11,2    | 8,28                                       | 14.06.2016                       | 526,17   | 777,44             | 21,51    | 37,57                                      | 4,83     | 8,71  | 335,0  |
| 11.08.2016   | 10,60   | 12.08.2016  | 10,58   | 0,51                                       | 11.08.2016                       | 456,28   | 713,93             | 21,76    | 37,24                                      | 4,84     | 7,55  | 234,7  |
| 19.02.2017   | 14,20   | 20.02.2017  | 10,58   | 0,11                                       | 21.02.2017                       | 533,17   | 2161,38            | 21,28    | 68,07                                      | 7,57     | 22,87   | 1321,6 |
| 10.04.2017   | 21,10   | 11.04.2017  | 20,12   | 0,0  | 11.04.2017                       | 584,08   | 703,30             | 20,61    | 32,27                                      | 12,32    | 14,15   | 157,8  |
| 18.02.2018   | 14,10   | 19.02.2018  | 12,84   | 0,0  | 21.02.2018                       | 553,71   | 3657,57            | 20,81    | 78,51                                      | 7,81     | 46,96   | 3383,1 |
| 13.05.2018   | 11,10   | 14.05.2018  | 9,66    | 1,63                                       | 10.05.2018                       | 682,50   | 794,67             | 16,62    | 45,06                                      | 7,58     | 7,68  | 8,7    |
| 15.11.2018   | 2,01    | 16.11.2018  | 3,44    | 1,42                                       | 14.11.2018                       | 485,06   | 3268,86            | 23,75    | 69,41                                      | 0,97     | 11,24   | 887,3  |
| 29.01.2019   | 18,50   | 30.01.2019  | 13,66   | 0,0  | 29.01.2019                       | 542,95   | 2085,46            | 21,55    | 56,10                                      | 10,04    | 28,49   | 1593,5 |
| 10.02.2019   | 17,10   | 11.02.2019  | 12,43   | 0,0  | 12.02.2019                       | 536,21   | 3793,30            | 22,48    | 80,84                                      | 9,17     | 47,15   | 3281,6 |
| 31.03.2019   | 3,23    | 01.04.2019  | 3,81    | 0,0  | 02.04.2019                       | 577,76   | 2043,31            | 20,25    | 45,11                                      | 1,87     | 7,79  | 511,4  |
| 11.09.2019   | 3,35    | 12.09.2019  | 2,51    | 0,0  | 10.09.2019                       | 487,86   | 2653,40            | 20,71    | 61,46                                      | 1,63     | 6,66  | 434,2  |
| 13.12.2019   | 3,33    | 14.12.2019  | 4,55    | 0,0  | 10.12.2019                       | 514,82   | 2486,82            | 23,07    | 61,59                                      | 1,71     | 11,32   | 829,5  |

Примітка. Рядки із заливкою відповідають періодам організованого скидання шахтних вод зі ставка-накопичувача у балці Свистунова. Сума аніонів, частка хлоридів від них, хімічний стік та його зміна розраховано для аніонів, наведених у табл. 1.

попередньою оцінкою додаткового стоку аніонів на досліджуваній ділянці у такі періоди можна вважати 32–450 т/добу. Розраховані значення стоку аніонів у ці періоди корелюють із витратою води р. Інгулець біля с. Андріївка (коефіцієнт кореляції між двома величинами 0,51, довірча ймовірність 0,93). Попередньо можна стверджувати, що потік солей зростає зі збільшенням витрати в річці.

У періоди скидання шахтних вод зі ставка-накопичувача в балці Свистунова стік аніонів зростав у середньому на 2314,3 т/добу з середньоквадратичним відхиленням 668,1 т/добу.

## ВИСНОВКИ

Ділянка р. Інгулець від греблі Карачунівського водосховища до с. Андріївка довжиною близько 70 км перебуває під потужним техногенним впливом внаслідок періодичних скидів шахтних вод, фільтрації з хвостосховищ і ставків-відстійників, фільтраційних втрат із русла до кар'єрів значної глибини та шахт.

Кількісний аналіз закономірностей водно-сольового режиму ділянки проведено за даними державного моніторингу вод, а також супутникових даних. Проаналізовано період із травня 2014 р. по грудень 2019 р., протягом якого налічувалося 22 дні з вимірами витрат та хімічного складу води та були наявні дані про скиди зі ставка-відстійника.

За аналізом водного балансу у ці дні встановлено зменшення витрати р. Інгулець від верхнього до нижнього створу ділянки у періоди без організованого скидання з Саксаганського водосховища та ставка-накопичувача у балці Свистунова, в середньому на 17%. Встановлено наявність тенденції до зв'язку між витратою у верхньому створі  $Q_0$  та її суттєвим зменшенням у нижньому створі  $\Delta Q_{01}$ . Однак на більш високому рівні статистичної значущості з довірчою ймовірністю 0,95 вона не підтверджується.

Частка хлоридів у аніонному складі води за виключенням гідрокарбонатів за період дослідження становила 20–22% у верхньому створі. У нижньому створі вона була більшою і варіювала від 38% у періоди між скиданнями шахтних вод до 68,3% під час проведення скидів. Статистично підтверджується зростання на 10–198% вмісту інших вимірюваних аніонів у річковій воді, крім фосфатів, після проходження даної ділянки в періоди між скидами шахтних вод, причому найбільше зростання зафіксовано для хлоридів. Найімовірнішим поясненням цього факту є надходження підземних вод зі підвищеним вмістом хлоридів над сульфатами на розглянутій ділянці, навіть за відсутності організованих скидів шахтних вод. Отримані значення дозволяють непрямо оцінювати ступінь заміщення річкової води підземною вищою солоністю, хоча варіативність витрат ускладнює таку оцінку.

У періоди між скиданнями шахтних вод стік аніонів на досліджуваній ділянці збільшувався в середньому на 240,8 т/добу або на 42,3%. Джерелами цього зростання можуть бути фільтрація мінералізованих вод із хвостосховищ та ставка-відстійника шахтних вод у балці Свистунова до р. Інгулець, потік солей з р. Саксагань, а також природний підвищений вміст солей у ґрунтових водах у долині р. Інгулець. У періоди скидання шахтних вод хімічний стік аніонів зростав і в середньому збільшувався на порядок; середнє значення його збільшення становило 2314,3 т/добу з середньоквадратичним відхиленням 668,1 т/добу.

Уточнення отриманих оцінок та елементів водного та сольового балансу і джерел засолення р. Інгулець на досліджуваній ділянці потребує побудови сполучених гідрологічних та гідрогеологічних моделей цієї частини басейну р. Інгулець із використанням цифрових моделей рельєфу, інструментів QGIS для розрахунку акумуляції та напрямків поверхневого стоку.

## ЛІТЕРАТУРА

- Bolotin, L.A., Summers, B.M., Savoy, Ph. & Blaszcak J.R. (2023). Classifying freshwater salinity regimes in central and western U.S. streams and rivers. *Limnology and Oceanography Letters*, **8**, 103–111. <https://doi.org/10.1002/lol2.10251>
- Cañedo-Argüelles, M., Kefford, B. & Schäfer, R. (2019). Salt in freshwaters: causes, effects and prospects — introduction to the theme issue. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, **374**(1764), 20180002. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0002>
- GIZ-Україна. (2017). Оптимізація скидання та утилізація надлишку шахтних вод (Звіт № 20669066/1).
- Hocking, C. & Bailey, R.T. (2022). Salt transport in a large agro-urban river basin: Modeling, controlling factors, and management strategies. *Front. Water*, **4**, 945682. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.945682>
- Linacre, E.T. (1977). A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, **18**(6), 409–424. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(77\)90007-3](https://doi.org/10.1016/0002-1571(77)90007-3)
- Mitko, K., Dydo, P., Milewski, A.K., Bok-Badura, J., Jakóbi-Kolon, A., Krawczyk, T., Cieplik, A., Krodkiewska, M., Spyra, A., Gzyl, G., et al. (2024). Mine wastewater effect on the aquatic diversity and the ecological status of the watercourses in Southern Poland. *Water*, **16**(9), 1292. <https://doi.org/10.3390/w16091292>
- NASA. (2025). Prediction Of Worldwide Energy Resources. Отримано 25 лютого 2025 із <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Perri, S., Suweis, S., Holmes, A., Marpu, P.R., Entekhabi, D. & Molini A. (2020). River basin salinization as a form of aridity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **117**(30), 17635–17642. <https://doi.org/10.1073/pnas.2005925117>

- Rudakov, D., Sun, Y. & Inkin, O. (2024). Optimization of mine water discharge with the river hydrograph. Case study Samara River in Western Donbas. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2024, 1348, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012041>
- Sherstiuk, N.P., Khilchevskiy V.K. & Zabokrytska, M.R. (2023). Environmental risk assessment of Kryvbas mine water discharges into the Inhulets River. *EAGE Conf. Proc., 17<sup>th</sup> International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2023, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520002>
- Wang, G., Xu, B., Tang, P., Shi, H., Tian, D., Zhang, C., Ren, J. & Li, Z. (2022). Modeling and evaluating soil salt and water transport in a cultivated land–wasteland–lake system of Hetao, Yellow River basin's upper reaches. *Sustainability*, 14(21), 14410. <https://doi.org/10.3390/su142114410>
- Winde, F. & Newman-Portela, A.M. (2026). Assessing mining-related water impacts: A case study-based systematic review supporting a more comprehensive approach. *Sustainability*, 18(4), 1774. <https://doi.org/10.3390/su18041774>
- Багрий, І. Д., Гожи́к, П. Ф., & Самоткал, Є. В. (2005). Гідросистема Криворізького басейну: стан і напрямки поліпшення. Фенікс.
- Державне агентство водних ресурсів України. (2026). Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України. Отримано 16 січня 2026 із <http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index>
- Район Каховка. (2024, 25 серпня). Підрив Каховської ГЕС: як менше, ніж за рік, вдалося побудувати магістральний водогін на Кривий Ріг. Отримано 23 березня 2026 із <https://kakhovka.rayon.in.ua/news/735380-pidriv-kakhovskoi-ges-yak-menshe-nizh-za-rik-vdalosya-pobuduvati-magistralniy-vodogin-na-kriviy-rig>
- Рудаків Д. В. & Битько Ю. М. (2025). Статистичний аналіз гідрологічних процесів в басейні р. Самара в умовах кліматичних змін. *Зб. наук. праць НГУ*, 82, 55–64. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.139>
- Сніжко, С., Шевченко, О., & Дідовець, Ю. (2021). Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України. *Екодія*.
- Степаненко, С. М., Польовий, А. М., Лобода, Н. С., та ін. (2015). Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України. ТЕС.
- Суспільне Дніпро. (2024, 6 червня). Без “моря” та води: як жителі Дніпропетровщини через підрив Каховської ГЕС залишилися без водопостачання. Отримано 23 березня 2026 із <https://suspilne.media/dnipro/762103-bez-mora-ta-vodi-ak-ziteli-dnipropetrovsini-cerez-pidriv-kahovskoi-ges-zalilisila-bez-vodopostacanna/>
- Хільчевський, В. К., Ромась, І. М., Ромась, М. І., Гребінь, В. В., & Шевчук, І. О. (2007). Гідролого-гідрохімічна характеристика мінімального стоку річок басейну Дніпра. Ніка-Центр.
- Хільчевський, В. К., Кравчинський Р.Л. & Чунарьов О.В. Гідрохімічний режим та якість води Інгульця в умовах техногенезу (2012). Ніка-Центр.
- Шерстюк, Є. А. (2021). Геотехнічна стійкість породних масивів в зоні впливу техногенного водообміну гірничорудного комплексу (дисертація, НТУ “Дніпровська політехніка”).
- Шерстюк, Н. П., & Хільчевський, В. К. (2012). Особливості гідрохімічних процесів у техногенних та природних водних об'єктах Кривбасу. Акцент ПП.

## REFERENCES

- Bahrii, I.D., Hozhyk, P.F., & Samotkal, Ye.V. (2005). Hidrosystema Kryvorizkoho baseinu: stan i napriamky polipshennia. Feniks. [in Ukrainian]
- Bolotin, L.A., Summers, B.M., Savoy, Ph. & Blaszczyk J.R. (2023). Classifying freshwater salinity regimes in central and western U.S. streams and rivers. *Limnology and Oceanography Letters*, 8, 103–111. <https://doi.org/10.1002/lo2.10251>
- Cañedo-Argüelles, M., Kefford, B. & Schäfer, R. (2019). Salt in freshwaters: causes, effects and prospects — introduction to the theme issue. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 374(1764), 20180002. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0002>
- Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy. (2026). Monitorynh ta ekolohichna otsinka vodnykh resursiv Ukrainy. <http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index> [in Ukrainian]
- GIZ Ukraina. (2017). Optymizatsiia skydannia ta utylizatsiia nadylyshku shakhtnykh vod (Report No. 20669066/1). [in Ukrainian]
- Hocking, C. & Bailey, R.T. (2022). Salt transport in a large agropolitan river basin: Modeling, controlling factors, and management strategies. *Front. Water*, 4, 945682. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.945682>
- Khilchevskiy, V.K., Romas, I.M., Romas, M.I., Hrebin, V.V., & Shevchuk, I.O. (2007). Hidroloho-hidrokhimichna kharakterystyka minimalnogo stoku richok baseinu Dnipra. Nika-Tsentr. [in Ukrainian]
- Khilchevskyy, V.K., Kravchynskyy, R.L. & Chunarov, O.V. Hidrokhimichnyy rezhym ta yakist vody Inhultsya v umovakh tekhnogenezu (2012). Nika-Tsentr. [in Ukrainian]
- Linacre, E.T. (1977). A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, 18(6), 409–424. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(77\)90007-3](https://doi.org/10.1016/0002-1571(77)90007-3)
- Mitko, K., Dydo, P., Milewski, A.K., Bok-Badura, J., Jakóbiak-Kolon, A., Krawczyk, T., Cieplok, A., Krodkiewska, M., Spyra, A., Gzyl, G., et al. (2024). Mine wastewater effect on the aquatic diversity and the ecological status of the watercourses in Southern Poland. *Water*, 16(9), 1292. <https://doi.org/10.3390/w16091292>
- NASA. (2025). Prediction of worldwide energy resources. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Perri, S., Suweis, S., Holmes, A., Marpu, P.R., Entekhabi, D. & Molini A. (2020). River basin salinization as a form of aridity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117(30), 17635–17642, <https://doi.org/10.1073/pnas.2005925117>
- Raion Kakhovka. (2024, 25th August). Pidriv Kakhovskoi HES: Yak menshe, nizh za rik, vdalosia pobuduvaty mahistralnyi vodohin na Kryvyi Rih. <https://kakhovka.rayon.in.ua/news/735380-pidriv-kakhovskoi-ges-yak-menshe-nizh-za-rik-vdalosya-pobuduvati-magistralniy-vodogin-na-kriviy-rig> [in Ukrainian]
- Rudakov, D.V. & Bytko Yu. M. (2025). Statystychnyy analiz hidrolo-hichnykh protsesiv v baseyni r. Samara v umovakh klimatychnykh zmin. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*, 82, 55–64. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/82.139>
- Rudakov, D., Sun, Y. & Inkin, O. (2024). Optimization of mine water discharge with the river hydrograph. Case study Samara River in Western Donbas. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2024, 1348, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012041>
- Sherstiuk N.P., Khilchevskiy V.K. & Zabokrytska, M.R. (2023). Environmental risk assessment of Kryvbas mine water discharges into the Inhulets River. *EAGE Conf. Proc., 17<sup>th</sup> International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological*

- Condition of the Environment*, **2023**, 1–5 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520002>
- Sherstiuk, N.P., & Khilchevskiy, V.K. (2012). Osoblyvosti hidrokhimichnykh protsesiv u tekhnohennykh ta pryrodnykh vodnykh ob'ektakh Kryvbasu. Aktsent PP. [in Ukrainian]
- Sherstiuk, Ye.A. (2021). Heotekhnichna stiikist porodnykh masyviv v zoni vplyvu tekhnohennoho vodoobminu hirnychorudnogo kompleksu (PhD thesis, NTU "Dniprovska politehnika"). [in Ukrainian]
- Snizhko, S., Shevchenko, O., & Didovets, Yu. (2021). Analiz vplyvu klimatychnykh zmin na vodni resursy Ukrainy. Ekodiia. [in Ukrainian]
- Stepanenko, S.M., Polovy, A.M., Loboda, N.S., et al. (2015). Klimatychni zminy ta yikh vplyv na sfery ekonomiky Ukrainy. TES. [in Ukrainian]
- Suspilne Dnipro. (2024, 6<sup>th</sup> June). Bez "moria" ta vody: Yak zhyteli Dnipropetrovshchyny cherez pidryv Kakhovskoi HES zalyshylysia bez vodopostachannia. <https://suspilne.media/dnipro/762103-bez-mora-ta-vodi-ak-ziteli-dnipropetrovshchyny-bez-pidryv-kahovskoi-ges-zalishylysia-bez-vodopostachannia/> [in Ukrainian]
- Wang, G., Xu, B., Tang, P., Shi, H., Tian, D., Zhang, C., Ren, J. & Li, Z. (2022). Modeling and evaluating soil salt and water transport in a cultivated land–wasteland–lake system of Hetao, Yellow River basin's upper reaches. *Sustainability*, **14**(21), 14410. <https://doi.org/10.3390/su142114410>
- Winde, F., Newman-Portela, A.M. (2026). Assessing mining-related water impacts: A case study-based systematic review supporting a more comprehensive approach. *Sustainability*, **18**(4), 1774. <https://doi.org/10.3390/su18041774>

## EVALUATION OF WATER-SALT REGIME PARAMETERS FOR THE INHULETS RIVER IN THE TECHNOGENIC AFFECTED ZONE BASED ON HYDROCHEMICAL MONITORING DATA

**Dmytro Rudakov<sup>1</sup>**

ORCID 0000-0001-7878-8692,  
[rudakov.d.v@nmu.one](mailto:rudakov.d.v@nmu.one)

**Olha Chehun<sup>2</sup>**

[info@dovr.gov.ua](mailto:info@dovr.gov.ua)

**Yurii Bytko<sup>1</sup>**

ORCID 0009-0006-1877-9587,  
[bytko.y.m@nmu.one](mailto:bytko.y.m@nmu.one)

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro

<sup>2</sup> Regional Office of Water Resources in Dnipropetrovsk Region, Dnipro

*The need to supply consumers with adequate quality water in the south of the Dnipropetrovsk region and water for irrigation in the Kherson and Mykolaiv regions requires thorough studying the features of the water-salt regime of the technogenically mostly loaded section of the Inhulets River, which is the purpose of this paper. Unlike previous studies of this section of the Inhulets River, which dealt primarily with average concentrations in river water and long-term trends, an analysis of state water monitoring data was conducted with a frequency of once every 1–3 months, involving data on daily water flows in two*

*sections for 6 years along with results from satellite surveying, the state hydrochemical monitoring data were analyzed to study the water-salt regime of the Inhulets River within the section of approximately 70 km length, situated between the Karachunivske dam reservoir and the village of Andriyivka. 22 short periods in 2014–2019 were examined in detail, during which the flow rate of the Inhulets River, discharges from the Saksahanske reservoir, and the anion contents in water in the upper and lower reaches of the river section were measured. Statistical analysis with water-salt balance equations assessed the technogenic and natural factors influencing the discharge of the Inhulets River and the increase in its water salinity. It was found that the anion content in river water after passing through the studied section during periods without extensive mine-water discharges increases by almost 1.5 times. This gives a quantitative assessment of the technogenic impact on the hydrogeochemical regime in the considered part of the Inhulets River valley. The share of chlorides in river water increases after passing through this area, on average, from 20–22% to 38% during periods without mine water discharges and 68% during periods with discharges from the mine water storage pond. The practical significance of the results is determined by the quantitative assessment of water losses and changes in water quality when using this section of the Inhulets Riverbed to transport fresh water to the southern areas of the Dnipropetrovsk region, where water supplies were disrupted following the destruction of the Kakhovka HPP dam.*

**Keywords:** water-salt regime, technogenic impact, river flow rate, underground runoff, anion content.



# ЧИСЛОВІ МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ В ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЇ

**Б.Ф. Христюк**

ORCID ID: 0000-0003-4290-3745

khryst@uhmi.org.ua

**Л.О. Горбачова**

ORCID ID: 0000-0003-1033-9385

gorbachova@uhmi.org.ua

УДК 556.06+556.013 (282.247.324)

DOI:

## ДЕКОМПОЗИЦІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВОГО РЯДУ ВИТРАТ ВОДИ РІЧКИ ДЕСНИ ЗАСОБАМИ ПАКЕТУ “BSTS” МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ R

Український  
гідрометеорологічний  
інститут ДСНС України  
та НАН України, Київ

Якісне прогнозування водності річок є важливою складовою для планування та функціонування різних водозалежних галузей економіки: сільського та комунального господарства, гідроенергетики, рибного господарства, судноплавства тощо. Прогнозування щоденних витрат води річок відбувається як на основі простих графічних методів, так і на основі детерміністичних та стохастичних моделей. Стаття присвячена застосуванню пакету “bsts” мови програмування R для моделювання та прогнозування щоденних витрат води р. Десна — с. Літки. Після декомпозиції часового ряду щоденних витрат води встановлено, що він складається з трьох компонент: тренду, сезонної складової та випадкових коливань. У процесі створення “bsts”-моделі розглядалися основні функції пакету “bsts”, які формують різні компоненти цієї моделі: *add.seasonal*, *add.local.level*, *add.ar*, *add.local.linear.trend*, *add.semilocal.linear.trend* та *add.student.local.linear.trend*. Результати моделювання щоденних витрат води навчальної та тестової вибірок оцінювалися за п'ятьма статистичними показниками: *residual.sd*, *prediction.sd*, *rsquare*, *relative.gof* та *MAPE*, а також за кривою накопичених похибок наступного кроку. У якості оптимальної моделі прийнято “bsts”-модель без предикторів, яка моделює щоденні витрати води за допомогою функції *add.student.local.linear.trend* та випадкових коливань. Така модель придатна для короткострокового прогнозування щоденних витрат води р. Десна — с. Літки у періоди їхнього тривалого та плавного підйому чи спаду, а також у період стійкої межени. Прогнозування щоденних витрат води за “bsts”-моделлю відбувається на основі тренду, що споріднює цю модель із прогнозуванням за кривими спаду весняного водопілля, які враховують виснаження запасів води у русловій мережі, та за тенденціями, які враховують інерційність гідрологічних процесів.

**Ключові слова:** пакет “bsts”, структурна модель часового ряду, витрати води, навчальна та тестова вибірки, тренди.

### ВСТУП

Для короткострокового прогнозування витрат води річок застосовують методи, які враховують закономірності руху водного потоку, дані про запаси води у русловій мережі, дані про опади на поверхні водозбору, а також різноманітні моделі (детерміністичні та стохастичні) (Guide to Hydrological Practices, 2009). Моделювання та прогнозування є важливими інструментами у різних галузях знань і, зокрема, у науках про Землю. Прогнозування майбутнього стану природного об'єкту чи середовища зазвичай відбувається на основі даних та знань про їхній минулий стан і тенденції змін. Отже, основним об'єктом досліджень при моделюванні та прогнозуванні є часовий ряд. На відміну від статичних наборів даних, у яких порядок спостережень може не

мати суттєвого значення, дані часових рядів хронологічно упорядковані, що дозволяє розкласти їх на декілька компонент: тренд, циклічність, сезонність та випадковість (Machiwal & Jha, 2012).

*Тренд* характеризує довготривалу тенденцію у часових рядах. Він може бути лінійним або нелінійним, а також тренд може змінювати напрямок від зростання до спаду чи навпаки.

*Циклічна компонента* відображає довготривалі циклічні коливання, які мають тривалість більше двох років. Тривалість циклів змінна.

*Сезонна компонента* враховує короточасні періодичні зміни у часових рядах. Вона має постійну частоту та амплітуду.

*Випадкова компонента* залежить від випадкових чинників.

Нині існує кілька різновидів моделей, заснованих на статистичній обробці часових рядів. До них відносять регресійні моделі (проста та множинна лінійна регресія, поліноміальна регресія) (Rozos, 2020; Zengin et al., 2023); авторегресійні моделі різних порядків (зокрема, модель ARIMA, яка поєднує у собі моделі авторегресії та ковзаючого середнього (Katimon et al., 2017; Ilich et al., 2018)); моделі експоненційного згладжування (Lukman & Tanan, 2021; Shang et al., 2025); моделі, засновані на штучних нейронних мережах (Chakravarti et al., 2015; Христюк та Горбачова, 2025); моделі, засновані на ланцюгах Маркова (Nor et al., 2021; Sharma & Panu, 2025) тощо. Баєсівська модель структурних часових рядів (BSTS) також є однією із різновидів статистичних моделей (Scott, 2025). В основі пакету “bsts” покладено методологію, яка відома під різними назвами: “байєсівські структурні моделі часових рядів”, “моделі простору станів”, “динамічні лінійні моделі”, моделі на основі фільтра Калмана тощо (Righetti, 2025). Пакет “bsts” дозволяє представляти часові ряди у вигляді суми компонентів, які не спостерігаються, але інтерпретуються як тренд, сезонність, ефект предикторів та випадкових чинників. Спочатку баєсівська модель структурних часових рядів була запропонована авторами для прогнозування економічних часових рядів (Scott & Varian, 2014), однак, ця модель успішно використовувалася для моделювання якості повітря в Малайзії (Mohammed et al., 2024), для довгострокового прогнозування температури поверхні Червоного моря (Bounceur et al., 2020) тощо.

Річка Десна є лівою найдовшою і другою за водністю після р. Прип'ять притокою р. Дніпро. Її водний стік значно впливає на стік р. Дніпро біля міста Києва, який є столицею України та її адміністративним і промисловим центром з населенням більше 3,5 млн людей (Khrystiuk & Gorbachova, 2019). Отже, прогнозування водного стоку р. Десна є важливим, перш за все, практичним завданням. Разом з цим, в умовах війни виникають труднощі в прогнозуванні, оскільки 54% басейну р. Десна розташовано на території держави-агресора російській федерації і дані спостережень з цієї території відсутні. За таких умов статистичні підходи відіграють пріоритетну роль, оскільки вони дозволяють виконувати моделювання і прогнозування водного стоку на основі часових рядів спостережень і не потребують детального опису всіх процесів формування водного стоку річки (Kochanek & Markiewicz, 2022).

**Метою дослідження** є застосування пакету “bsts” мови програмування R для моделювання та прогнозування щоденних витрат води р. Десна — с. Літки.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Річка Десна починається з боліт, розташованих на відстані 9 км на північний схід від м. Єльня, Смоленської області, російської федерації, на висоті 238 м над рівнем моря та впадає у річку Дніпро біля Києва на висоті 92 м над рівнем моря. Річка Десна тече переважно з півночі на південний захід по території Смоленської і Брянської областей російської федерації та Чернігівської, Сумської і Київської областей України (рис. 1).

Площа водозбору р. Десни становить 88900 км<sup>2</sup>, а довжина — 1126 км. Річку поділяють на верхню (від витoku до м. Брянськ), середню (від м. Брянськ до м. Чернігів) та нижню (від м. Чернігів до гирла) частини. У верхів'ях річка тече низинною, заболоченою місцевістю (Горбачова & Колянчук, 2011). Основна частина басейну розташована на горбистому плато, яке складене породами з підвищеним складом карбонатів, які піддаються інтенсивній схиловій ерозії. Північна частина басейну вкрита змішаними лісами, а південна — відноситься до лісостепової зони. Клімат у басейні Десни помірно-континентальний та визначається особливостями атмосферної циркуляції, радіаційними чинниками та характером підстильної поверхні. Вплив кожного з них протягом року не рівнозначний, і залежить від основних атмосферних утворень — циклонів та антициклонів. На території водозбору Десни провідна роль належить циклональним утворенням. Зазвичай прихід циклонів супроводжується атмосферними опадами та змінами температури повітря в залежності від сезону року. Взимку циклиони приносять потепління та відлиги, а влітку — похолодання. Натомість антициклон супроводжується підвищенням тиску та більш сухою погодою. Поширення антициклонів влітку призводить до встановлення теплої, іноді спекотної погоди, а взимку спостерігаються низькі (особливо вночі) температури повітря (Ліпінський та ін., 2003). Річка Десна належить до типу рівнинних річок із переважним сніго-дощовим живленням. Режим стоку у річному розрізі характеризується високим і різким весняним підйомом, та відносно низькою літньо-осінньої меженню. У період весняного водопілля стік річки становить до 57% річного стоку. Зимою та восени стік складає по 13% річного стоку, а влітку — 17% (Кошкіна, 2017). Гідрологічний пост р. Десна — с. Літки розташований на відстані 37 км від гирла (площа водозбору 88500 км<sup>2</sup>) (Щорічні дані, 2021).

У дослідженні використано дані мережі спостережень Українського гідрометеорологічного центру: щоденні витрати води на гідрологічному посту р. Десна — с. Літки за період 2015–2023 рр., які

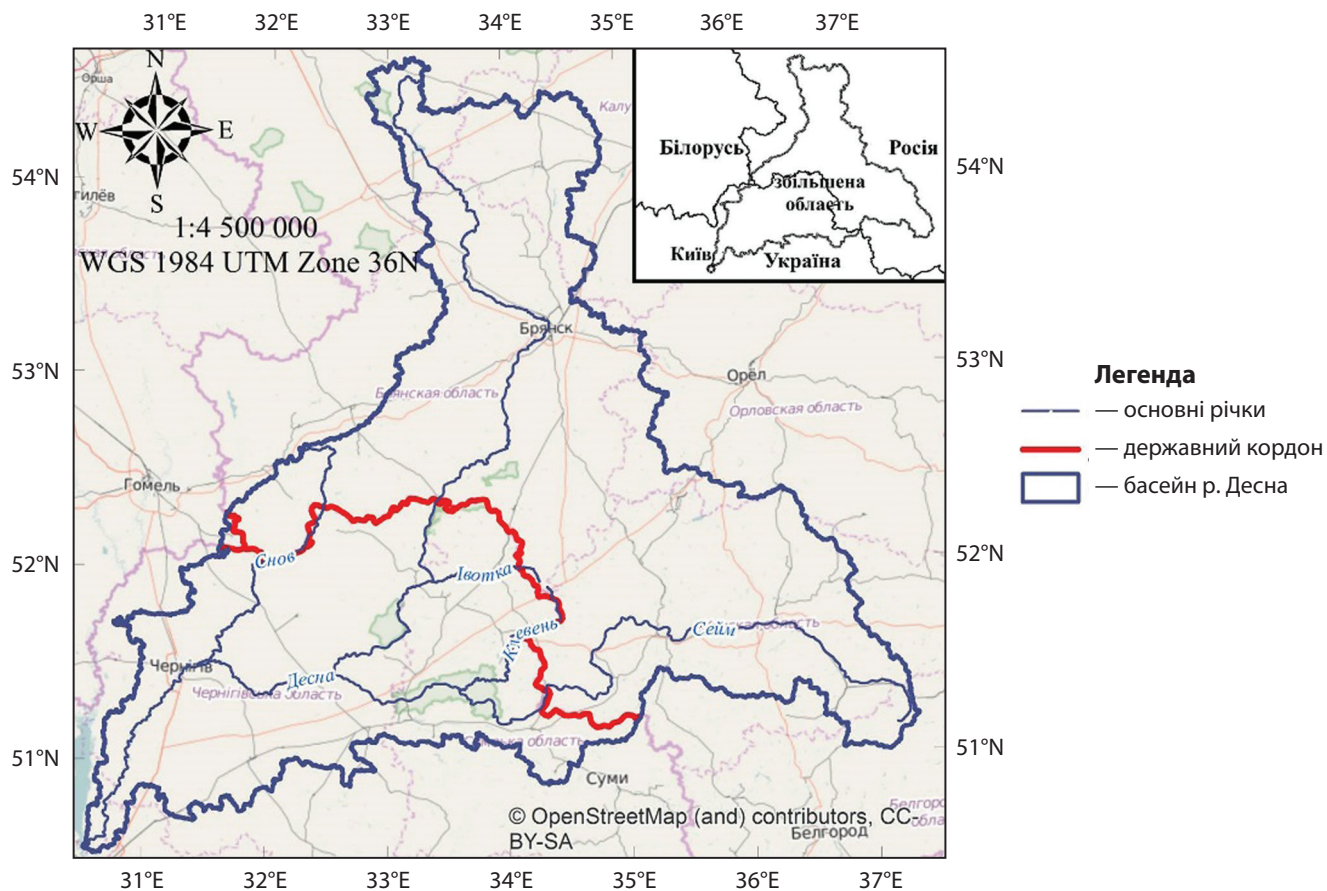


Рис. 1. Басейн річки Десни (Кошкіна, 2017)

опубліковані у гідрологічних щорічниках Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського. Дослідження складається з наступних етапів (рис. 2).

**Збір вихідних даних.** Щоденні витрати води р. Десна — с. Літки за період 2015–2022 рр. були занесені до електронної таблиці Excel у вигляді двох колонок: дати та значення витрати води. Загалом у



Рис. 2. Етапи дослідження

таблиці було 2922 рядки. Щоденні витрати води за 2023 рік використовувалися як незалежні дані для перевірки прогнозів за "bsts"-моделлю.

**Конвертація вихідних даних.** Вихідні дані, зібрані у вигляді електронної таблиці Excel, надалі двічі конвертувалися у потрібні формати за допомогою функцій мови програмування R. Для процедури декомпозиції часового ряду вихідні дані були перетворені у часову серію за допомогою функції *ts*, а для створення "bsts"-моделі — в об'єкт *tsibble* за допомогою функції *as\_tsibble* (Hyndman & Killick, 2026).

**Декомпозиція часового ряду.** Для декомпозиції часового ряду щоденних витрат води р. Десна — с. Літки на різні компоненти нами використовувалася функція *decompose* мови програмування R. Процедура декомпозиції допомагає виявити структуру часового ряду (Svetunkov, 2023).

**Створення "bsts" — моделей.** У нашому дослідженні створювалася структурна модель часового ряду щоденних витрат води р. Десна — с. Літки без предикторів. Були розглянуті основні функції пакету "bsts", які формують різні компоненти цієї моделі (Scott, 2025):

- *add.seasonal* — сезонна компонента, яка відображає наявність у часовому ряді коливань із чіткою частотою та сталою амплітудою;
- *add.local.level* — локальний рівень, який відповідає процесу “випадкового блукання з шумом”;
- *add.ar* — авторегресійний процес, відповідно до якого поточний середній рівень часового ряду має лінійний зв’язок із його попередніми значеннями;
- *add.local.linear.trend* — локальний лінійний тренд. Вважається, що динаміка середнього рівня часового ряду та коефіцієнта його приросту (кут нахилу тренду) описується процесом “випадкового блукання”;
- *add.semilocal.linear.trend* — напівлокальний лінійний тренд. Відрізняється від локального лінійного тренду тим, що коефіцієнт приросту середнього рівня часового ряду розвивається відповідно до авторегресійного процесу першого порядку;
- *add.student.local.linear.trend* — стійкий локальний лінійний тренд. Відрізняється від локального лінійного тренду тим, що його випадкові коливання підкоряються розподілу Стьюдента, а не Гауса.

Оцінка та вибір моделі. Результати моделювання щоденних витрат води навчальної та тестової вибірок оцінювалися за п’ятьма статистичними показниками:

- *residual.sd* — середнє значення апостеріорного (оновленого на основі нових даних) розподілу стандартного відхилення залишків моделі;
- *prediction.sd* — стандартне відхилення похибок наступного кроку, які розраховуються у процесі підгонки моделі за даними навчальної вибірки;
- *rsquare* — коефіцієнт детермінації (доля, дисперсії залишків від загальної дисперсії в даних);
- *relative.gof* — статистика Харві, яка розраховується на основі похибок наступного кроку в процесі підгонки моделі за даними навчальної вибірки;
- *MAPE* — середня абсолютна відсоткова похибка, яка визначається на основі даних тестової вибірки за формулою:

$$MAPE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|Q_i - Q_{pi}|}{Q_i} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $Q_i$  та  $Q_{pi}$  — фактичні та прогнозовані витрати води тестової вибірки, відповідно;  $n$  — кількість значень тестової вибірки.

Для розрахунку *MAPE* використано середні та медіанні значення великої кількості можливих реалізацій майбутніх значень залежної змінної, які надають “*bsts*”-моделі. Оптимальна модель вибиралась за кращими статистичними показниками та за допомогою функції *compare.bsts.models* пакету “*bsts*”, яка відображає накопичення середніх абсолютних

похибок наступного кроку для моделей, що порівнюються (Scott, 2025).

*Прогноз щоденних витрат води.* Прогнозування відбувалося за оптимальною моделлю, а його результат порівнювався із фактичними витратами води та оцінювався за значеннями *MAPE*, які розраховувалися за медіанними прогнозними значеннями витрат води.

Усі розрахунки були виконані у RStudio (версія 2025.09.2 Build 418) з використанням пакету “*bsts*” (Scott, 2025). Програмний код було нами написано мовою R (версія 4.5.2 (2025-10-31 ucrt)).

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

За період 2015–2022 рр. щоденні витрати води на гідрологічному посту р. Десна — с. Літки коливалися у межах 71,0–718 м<sup>3</sup>/с. Щорічно на річці спостерігалися весняні водопілля різної висоти, а у 2018 році, окрім весняного водопілля, також відбувся короткочасний та відносно високий зимовий паводок (рис. 3).

Часовий ряд щоденних витрат води на посту р. Десна — с. Літки за період 2015–2022 рр. був розкладений на три компоненти за допомогою функції *decompose* мови програмування R. Цей ряд складається з трьох компонент: тренду, сезонної складової та випадкових коливань (рис. 4). Періодичність сезонної компоненти становить один рік. Сезонна компонента частково має від’ємні значення, що унеможливує її використання для моделювання та прогнозування щоденних витрат води р. Десна біля с. Літки. Перед створенням байєсівської структурної моделі часового ряду щоденних витрат води на посту р. Десна — с. Літки загальна вибірка (2015–2022 рр.) була розділена на навчальну та тестову. До тестової вибірки увійшли останні 40 значень витрат води (з 22.11.2022 по 31.12.2022 року).

Надалі, до часового ряду щоденних витрат води р. Десна — с. Літки почергово застосовувалися

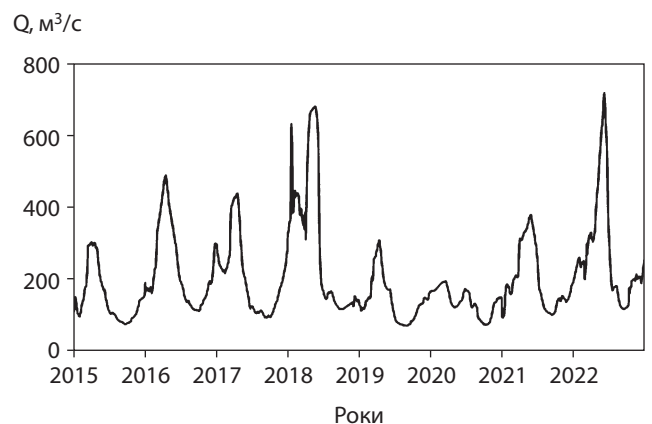


Рис. 3. Гідрограф р. Десна — с. Літки, 2015–2022 рр.

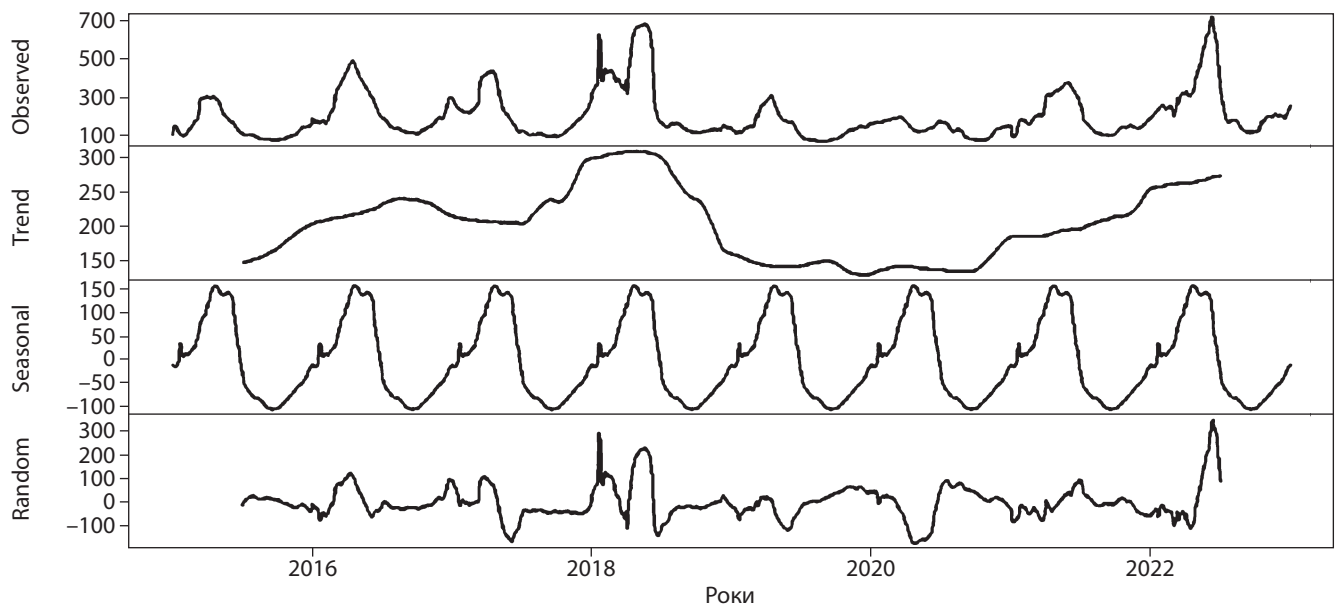


Рис. 4. Декомпозиція часового ряду щоденних витрат води на гідрологічному посту р. Десна — с. Літки, 2015–2022 рр.

функції *add.seasonal*, *add.local.level*, *add.ar*, *add.local.linear.trend*, *add.semilocal.linear.trend* and *add.student.local.linear.trend*. Оцінка результатів застосування цих функцій виконувалася за п'ятьма статистичними показниками (табл. 1).

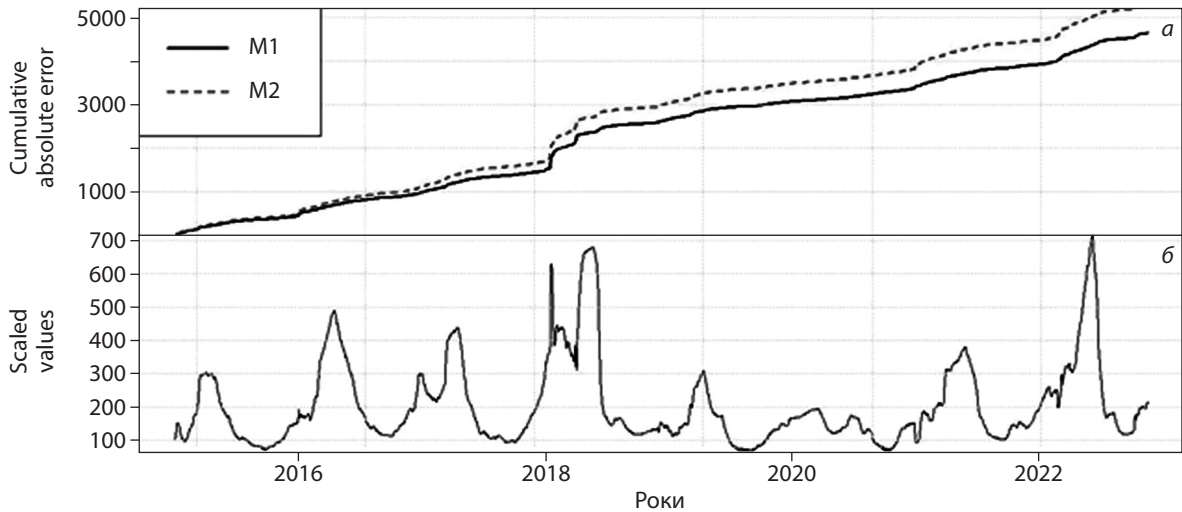
Усі статистичні показники, за якими оцінювалися результати застосування функції *add.seasonal*, вказують на її непридатність для моделювання та прогнозування щоденних витрат води р. Десна — с. Літки, що уже було встановлено на етапі декомпозиції часового ряду. Найкращий результат за усіма статистичними показниками, окрім значень MAPE, було отримано для функції *add.student.local.linear.trend*, а найкращі значення MAPE було отримано для функції *add.local.linear.trend*. Для вибору оптимальної моделі була застосована функція *compare.bsts.models*. Оскільки крива накопичених похибок наступного кроку моделі з функцією *add.student.local*

*linear.trend* розташована нижче моделі з функцією *add.local.linear.trend*, то саме модель із функцією *add.student.local.linear.trend* прийнята як оптимальна (рис. 5, а). Під графіком накопичення похибок (рис. 5, а) розташований гідрограф р. Десна — с. Літки за 2015–2022 рр. (рис. 5, б), що дозволяє виявити місця, де моделі незадовільно описують вихідні дані. Таким місцем для обох моделей є зимовий паводок 2018 року, де обидві моделі мають різке зростання похибок.

Отже, байєсівська структурна модель часового ряду щоденних витрат води р. Десна — с. Літки складається із тренду, який описується функцією *add.student.local.linear.trend*, та випадкових коливань. Припускається, що процесом "випадкового блукання" можна описати динаміку як середнього рівня часового ряду  $\mu_t$ , так і коефіцієнта його приросту  $\delta_t$  (кут нахилу тренда):

Таблиця 1. Статистичні показники результатів застосування функцій до часового ряду щоденних витрат води р. Десна — с. Літки, 2015–2022 рр.

| Статистичні показники                 | Функції     |               |         |              |          | MAPE, % |  |
|---------------------------------------|-------------|---------------|---------|--------------|----------|---------|--|
|                                       | residual.sd | prediction.sd | rsquare | relative.gof | MAPE, %  |         |  |
|                                       |             |               |         |              | медіанне | середнє |  |
| <i>add.seasonal</i>                   | 152,0       | 107,8         | -0,439  | -1362,8      | 132,8    | 133,8   |  |
| <i>add.local.level</i>                | 1,14        | 6,45          | 0,99992 | -0,047       | 6,14     | 6,10    |  |
| <i>add.ar</i>                         | 2,98        | 5,58          | 0,99945 | 0,214        | 5,75     | 5,72    |  |
| <i>add.local.linear.trend</i>         | 1,06        | 4,58          | 0,99993 | 0,473        | 5,48     | 5,66    |  |
| <i>add.semilocal.linear.trend</i>     | 1,01        | 4,31          | 0,99994 | 0,533        | 5,95     | 6,00    |  |
| <i>add.student.local.linear.trend</i> | 0,66        | 4,23          | 0,99997 | 0,550        | 6,31     | 9,88    |  |



**Рис. 5.** Накопичені похибки наступного кроку двох моделей (а) та гідрограф р. Десна — с. Літки, 2015–2022 (б) (M1 — модель з функцією *add.student.local.linear.trend*, M2 — модель з функцією *add.local.linear.trend*)

$$y_t = \mu_t + \varepsilon_t; \quad (2)$$

$$\mu_t = \mu_{t-1} + \delta_{t-1} + u_t; \quad (3)$$

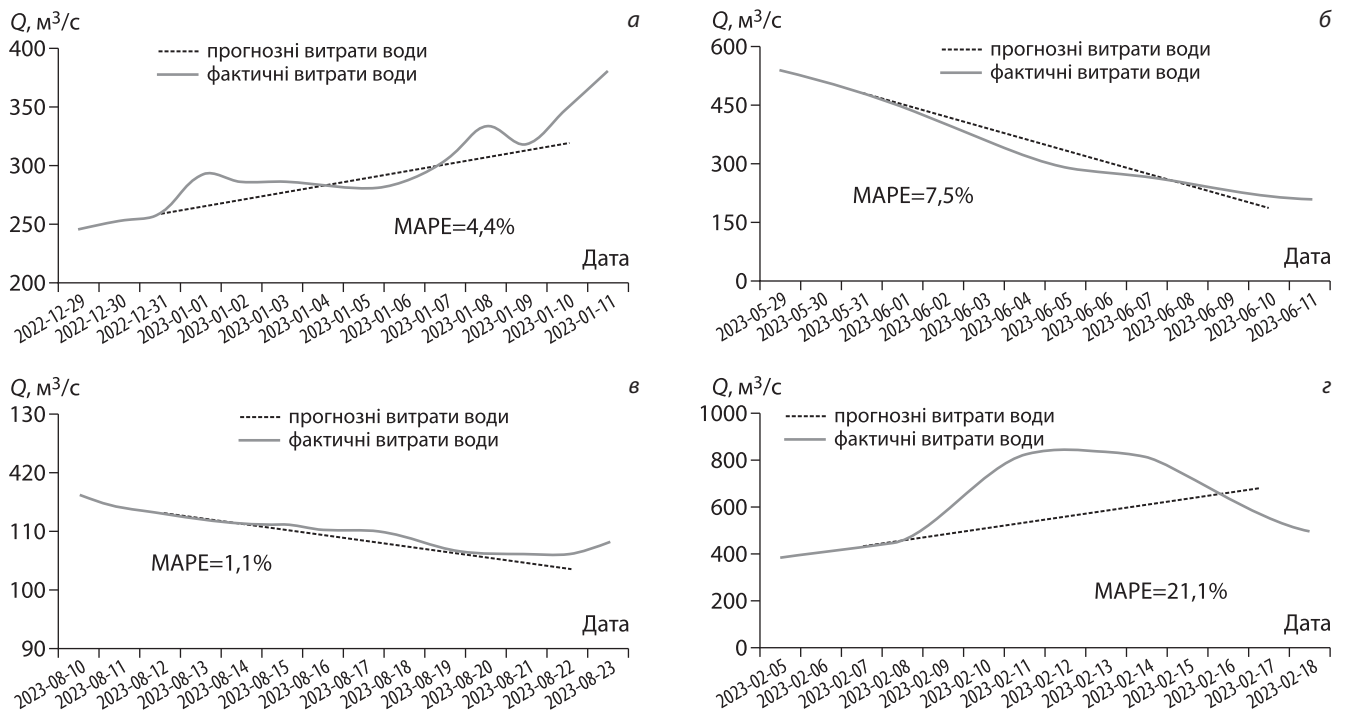
$$\delta_t = \delta_{t-1} + v_t, \quad (4)$$

де  $y_t$  — значення змінної, яка моделюється, у момент часу  $t$ ;  $\varepsilon_t$ ,  $u_t$ ,  $v_t$  — випадкові коливання, які підкоряються розподілу Стюдента.

Розроблена нами "bsts"-модель була перевірена за щоденними витратами води р. Десна — с. Літки у 2023 році. У процесі перевірки було виявлено, що прогнози за "bsts"-моделлю цілком задовільно узго-

джуються із фактичними витратами води у періоди їхнього плавного та тривалого підйому (рис. 6, а) чи спаду (рис. 6, б), а також у період стійкої межени (рис. 6, в). Значні похибки прогнозу виникають у періоди, коли стрімкий підйом витрат води змінюється на стрімкий спад та навпаки (рис. 6, г).

Прогнозування щоденних витрат води за створеною нами "bsts"-моделлю має деякі спільні риси з прогнозуванням за кривими спаду весняного водопілля, які враховують виснаження запасів води у русловій мережі, та за тенденціями, які враховують



**Рис. 6.** Результати прогнозування за "bsts"-моделлю у різні фази водного режиму р. Десна біля с. Літки у 2023 році

інерційність гідрологічних процесів (Бефани та Калинин, 1983).

Прогнозні значення щоденних витрат води за байєсівською структурною моделлю мають середні та медіанні значення. Часові ряди щоденних витрат води містять екстремуми (як високі так і низькі) і медіанне значення менш чутливе до таких екстремумів ніж середнє значення. Саме тому, в якості прогнозних значень щоденних витрат води за "bsts"-моделлю, слід приймати медіанні значення.

## ВИСНОВКИ

У дослідженні застосовано пакет "bsts" мови програмування R для моделювання та прогнозування щоденних витрат води р. Десна — с. Літки. Розроблено "bsts"-модель без предикторів, яка моделює щоденні витрати води за допомогою функції `add.student.local.linear.trend` та випадкових коливань. Перевірка моделі за незалежними даними 2023 року показала, що ця модель придатна для короткострокового прогнозування щоденних витрат води у

періоди їхнього тривалого та плавного підйому чи спаду, а також у період стійкої межени. Прогнозування щоденних витрат води за "bsts"-моделлю схожа на прогнозування за кривими спаду весняного водопілля, які враховують виснаження запасів води у русловій мережі, та за тенденціями, які враховують інерційність гідрологічних процесів. Разом із цим, перевагою "bsts"-моделі є те, що вона потребує мінімальної кількості вихідних даних (один часовий ряд) і це значно спрощує процес прогнозування водного стоку. Наступним кроком може бути розроблення методики для оперативного прогнозування щоденних витрат води р. Десна — с. Літки на основі "bsts"-моделі.

Дане дослідження виконано згідно держбюджетної теми 2/24 "Удосконалення методу довгострокового прогнозу припливу води річки Десни до Канівського водосховища в сучасних кліматичних умовах" Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України (№ державної реєстрації 0124U000781).

## ЛІТЕРАТУРА

- Бефани, Н.Ф., & Калинин, Г.П. (1983). Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам (2-ое издание). Ленинград: Гидрометеоздат.
- Кошкіна, О.В. (2017). Чинники, параметри та сучасні тенденції максимального стоку весняного водопілля в басейні річки Десна. Дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.07. Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ.
- Горбачова, Л.О., & Коляничук, О.В. (2011). Каталог весняних водопіль в басейні річки Десна. *Наук. праці УкрНДГМІ*, **261**, 179–191.
- Ліпінський, В.М., Дячук, В.А., & Бабіченко, В.М. (2003). Клімат України. Київ: Видавництво Раєвського.
- Христюк, Б.Ф., & Горбачова, Л.О. (2025). Моделювання дощових паводків річки Стрий за допомогою штучної нейронної мережі. *Метеорологія, гідрологія, моніторинг довкілля*, **1**(7), 71–78. <https://doi.org/10.15407/meteorology2025.07.071>
- Щорічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші, 2020 р. Частина 1. Річки і канали. Вип. 2. Басейн Дніпра (2021). Київ: Центральна геофізична обсерваторія ім. Бориса Срезневського.
- Bouncœur, N., Hoteit, I., & Knio, O. (2020). A Bayesian structural time series approach for predicting Red Sea temperatures. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **13**, 1996–2009. <http://doi.org/10.1109/jstars.2020.2989218>
- Chakravarti, A., Joshi, N., & Panjiar, H. (2015). Rainfall runoff analysis using artificial neural network. *Indian Journal of Science and Technology*, **8**(14), 1–7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i14/54370>
- Guide to Hydrological Practices (2009). Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. Vol. II. Sixth edition. WMO-No. 168. Geneva: World Meteorological Organization.
- Hyndman, R.J., & Killick, R. (2026). CRAN Task View: Time Series Analysis. Version 2026-01-31. Available at: <https://CRAN.R-project.org/view=TimeSeries>
- Ilich, N., Gharib, A., & Davies, E.G.R. (2018). Kernel distributed residual function in a revised multiple order autoregressive model and its applications in hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, **63**(12), 1745–1758. <https://doi.org/10.1080/02626666.2018.1541090>
- Katimon, A., Shahid, Sh., & Mohsenipour, M. (2018). Modeling water quality and hydrological variables using ARIMA: a case study of Johor River, Malaysia. *Sustainable Water Resources Management*, **4**(4), 991–998. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0202-8>
- Khrystiuk, B., & Gorbachova, L. (2019). Long-term forecasting of extraordinary spring floods by commensurability method on the Dnipro River near Kyiv city, Ukraine. *Environmental Research, Engineering and Management*, **75**(2), 74–81. <https://doi.org/10.5755/j01.arem.75.2.22683>
- Kochanek, K., & Markiewicz, I. (2022). Statistical approach to hydrological analysis. *Water*, **14**, 1094. <https://doi.org/10.3390/w14071094>
- Lukman, M. & Tanan, B. (2021). Time series modeling by using exponential smoothing technique for river flow discharge forecasting (case study: Cabenge, Walanae, and Cenranae rivers system). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1088. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1088/1/012100>
- Machiwal, D., & Jha, M.K. (2012). Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice. India, New Delhi: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1861-6>
- Mohammed, A., Bakar, M.A.A., Mansor, M.M., & Ariff, N.M. (2024). Modelling Malaysia Air Quality Data using Bayesian Structural Time Series Models. *Sains Malaysiana*, **53**(11), 3817–3829. <http://doi.org/10.17576/jsm-2024-5311-23>
- Nop, C., Fadhil, R.M., & Unami, K. (2021). A multi-state Markov chain model for rainfall to be used in optimal operation of rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production*, **285**, 124912. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124912>
- Righetti, N. (2025). Time Series Analysis with R. Available at: <https://nicolarighetti.github.io/Time-Series-Analysis-With-R/>

- Rozos, E. (2020). A methodology for simple and fast streamflow modelling. *Hydrological Sciences Journal*, **65**(7), 1084–1095. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1728475>
- Scott, S.L. (2025). Package "bsts". Bayesian structural time series. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/bsts/bsts.pdf>
- Scott, S.L., & Varian, H.R. (2014). Predicting the present with Bayesian structural time series. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, **5**(1–2), 4–23. <https://doi.org/10.1504/IJMMNO.2014.059942>
- Shang, M., Huang, J., Liu, P., Gao, J., & Li, J. (2025). Coupled exponential smoothing and gray model for water quality prediction in the Guo River, China. *Water Science and Technology*, **91**(8), 960–976. <https://doi.org/10.2166/wst.2025.051>
- Sharma, T.C., & Panu, U.S. (2025). Modelling hydrological droughts in Canadian rivers based on Markov chains using the standardized hydrological index as a platform. *Hydrology*, **12**, 23. <https://doi.org/10.3390/hydrology12020023>
- Svetunkov, I. (2023). Forecasting and Analytics with the Augmented Dynamic Adaptive Model (ADAM). New York: Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781003452652>
- Zengin, H., Özcan, M., Değermenci, A.S., & Çitgez, T. (2023). Multiple linear regression models for the estimation of water flows for forest management and planning in Türkiye. *Water SA*, **49**(3), 220–229. <https://doi.org/10.17159/wsa/2023.v49.i3.4000>

## REFERENCES

- Annual data on the regime and resources of land surface waters, 2020. Part 1. Rivers and Channels. Vol. 2. Dnipro Basin (2021). Kyiv: Central Geophysical Observatory named after Boris Sreznevsky. [in Ukrainian]
- Befany, N.F., & Kalinin, G.P. (1983). Exercises and methodological developments on hydrological forecasts (2<sup>nd</sup> edition). Leningrad: Hydrometeoizdat. [in Russian]
- Bounceur, N., Hoteit, I., & Knio, O. (2020). A Bayesian structural time series approach for predicting Red Sea temperatures. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **13**, 1996–2009. <http://doi.org/10.1109/jstars.2020.2989218>
- Chakravarti, A., Joshi, N., & Panjiar, H. (2015). Rainfall Runoff Analysis Using Artificial Neural Network. *Indian Journal of Science and Technology*, **8**(14), 1–7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i14/54370>
- Gorbachova, L.A., & Kolyanchuk, O.V. (2011). Catalog of spring floods in the basin of the Desna River. *Nauk. pratsi UkrNDGMI*, **261**, 179–191. [in Ukrainian]
- Guide to Hydrological Practices (2009). Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. Vol. II. Sixth edition. WMO-No. 168. Geneva: World Meteorological Organization.
- Hyndman, R.J., & Killick, R. (2026). CRAN Task View: Time Series Analysis. Version 2026-01-31. Available at: <https://CRAN.R-project.org/view=TimeSeries>
- Ilich, N., Gharib, A., & Davies, E.G.R. (2018). Kernel distributed residual function in a revised multiple order autoregressive model and its applications in hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, **63**(12), 1745–1758. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1541090>
- Katimon, A., Shahid, Sh., & Mohsenipour, M. (2018). Modeling water quality and hydrological variables using ARIMA: A case study of Johor River, Malaysia. *Sustainable Water Resources Management*, **4**(4), 991–998. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0202-8>
- Khrystiuk, B., & Gorbachova, L. (2019). Long-term forecasting of extraordinary spring floods by commensurability method on the Dnipro River near Kyiv city, Ukraine. *Environmental Research, Engineering and Management*, **75**(2), 74–81. <https://doi.org/10.5755/j01.ere.m.75.2.22683>
- Khrystiuk, B., & Gorbachova, L. (2025). Simulation of rain floods of the Stryi River by an artificial neural network. *Meteorology, Hydrology, Environmental monitoring*, **1**(7), 71–78. <https://doi.org/10.15407/meteorology2025.07.071> [in Ukrainian]
- Kochanek, K., & Markiewicz, I. (2022). Statistical approach to hydrological analysis. *Water*, **14**, 1094. <https://doi.org/10.3390/w14071094>
- Koshkina, O.V. (2017). Factors, parameters and current tendencies of the maximum runoff of spring flood in the Desna River basin. Dys. ... kand. geogr. nauk: 11.00.07. Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv. [in Ukrainian]
- Lipinskiy, V.M., Dyachuk, V.A., & Babichenko, V.M. (2003). Climate of Ukraine. Kyiv: Raevsky Publishing House. [in Ukrainian]
- Lukman, M. & Tanan, B. (2021). Time series modeling by using exponential smoothing technique for river flow discharge forecasting (case study: Cabenge, Walanae, and Cenranae rivers system). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1088. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1088/1/012100>
- Machiwal, D., & Jha, M.K. (2012). Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice. India, New Delhi: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1861-6>
- Mohammed, A., Bakar, M.A.A., Mansor, M.M., & Ariff, N.M. (2024). Modelling Malaysia Air Quality Data using Bayesian Structural Time Series Models. *Sains Malaysiana*, **53**(11), 3817–3829. <http://doi.org/10.17576/jsm-2024-5311-23>
- Nop, C., Fadhil, R.M., & Unami, K. (2021). A multi-state Markov chain model for rainfall to be used in optimal operation of rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production*, **285**, 124912. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124912>
- Righetti, N. (2025). Time Series Analysis with R. Available at: <https://nicolarighetti.github.io/Time-Series-Analysis-With-R/>
- Rozos, E. (2020). A methodology for simple and fast streamflow modelling. *Hydrological Sciences Journal*, **65**(7), 1084–1095. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1728475>
- Scott, S.L. (2025). Package "bsts". Bayesian structural time series. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/bsts/bsts.pdf>
- Scott, S.L., & Varian, H.R. (2014). Predicting the Present with Bayesian Structural Time Series. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, **5**(1–2), 4–23. <https://doi.org/10.1504/IJMMNO.2014.059942>
- Shang, M., Huang, J., Liu, P., Gao, J., & Li, J. (2025). Coupled exponential smoothing and gray model for water quality prediction in the Guo River, China. *Water Science and Technology*, **91**(8), 960–976. <https://doi.org/10.2166/wst.2025.051>
- Sharma, T.C., & Panu, U.S. (2025). Modelling hydrological droughts in Canadian rivers based on Markov chains using the standardized hydrological index as a platform. *Hydrology*, **12**, 23. <https://doi.org/10.3390/hydrology12020023>
- Svetunkov, I. (2023). Forecasting and Analytics with the Augmented Dynamic Adaptive Model (ADAM). New York: Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781003452652>

Zengin, H., Özcan, M., Değermenci, A.S., & Çitgez, T. (2023). Multiple linear regression models for the estimation of water flows for forestmanagement and planning in Türkiye. *Water*

SA, **49**(3), 220–229. <https://doi.org/10.17159/wsa/2023.v49.i3.4000>

## DECOMPOSITION, MODELING AND FORECASTING OF THE TIME SERIES OF DISCHARGE OF THE DESNA RIVER USING THE “BSTS” PACKAGE OF THE R PROGRAMMING LANGUAGE

**Borys Khrystiuk**

ORCID ID: 0000-0003-4290-3745

[khryst@uhmi.org.ua](mailto:khryst@uhmi.org.ua)

**Liudmyla Gorbachova**

ORCID ID: 0000-0003-1033-9385

[gorbachova@uhmi.org.ua](mailto:gorbachova@uhmi.org.ua)

Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Qualitative forecasting of river water levels is an important component for planning and functioning of various water-dependent sectors of the economy: agriculture and municipal services, hydropower, fisheries, shipping, etc. Forecasting of river daily discharges is based on both simple graphical methods and deterministic and stochastic models. The article is devoted to the use of the “bsts” package of the R programming language for modeling and forecasting daily discharges of the Desna

River — Litky village. After decomposition of the time series of daily discharges was found that these series consist of three components: a trend, a seasonal component, and random fluctuations. In the process of creating the “bsts” model, the main functions of the “bsts” package, which form the various components of this model, were considered: *add.seasonal*, *add.local.level*, *add.ar*, *add.local.linear.trend*, *add.semilocal.linear.trend* and *add.student.local.linear.trend*. The results of modeling the daily discharges of the training and test samples were evaluated using five statistical indicators: *residual.sd*, *prediction.sd*, *rsquare*, *relative.gof* and *MAPE*, and also by the accumulated error curve of the next step. The optimal model is the “bsts” — model without predictors, which models daily discharges using the *add.student.local.linear.trend* function and random fluctuations. This model is suitable for short-term forecasting of daily discharges of the Desna River — Litky village during periods of their long and smooth increase or decrease, as well as during periods of stable low water levels. Forecasting daily discharges using the “bsts” — model is based on a trend that relates this model to forecasting based on spring flood decline curves, which take into account the depletion of water reserves in the channel network, and trends that take into account the inertia of hydrological processes.

**Keywords:** package “bsts”; structural model of time series, discharge, training and test samples, trends



# МОНІТОРИНГ І ПРОБЛЕМИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ

**С.І. Кіреєв**

ORCID: 0000-0001-7059-3655  
s.kireev@ukr.net

**Т.І. Нікітіна**

ORCID: 0009-0003-6940-0686

**Д.А. Самойлов**

ORCID: 0009-0000-0465-4077

**О.Г. Бунтова**

ORCID: 0009-0001-2060-3613

**О.А. Федоренко**

ORCID: 0009-0006-1387-709X

**Т.В. Пилипчук**

ORCID: 0009-0008-6908-0420

**В.В. Лясківський**

ORCID: 0009-0000-7908-5809

**В.Д. Горovenko**

Державне спеціалізоване підприємство "ЕКОЦЕНТР", м. Чорнобиль

УДК 502.504

DOI:

## РАДІАЦІЙНИЙ СТАН ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ У 2025 РОЦІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ РАДІАЦІЙНО-ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Наведено результати радіаційного моніторингу довкілля в зоні відчуження за 2025 рік, які включають аналітичні дані щодо: потужності еквівалента амбієнтної дози гамма-випромінювання характерної для територій на північному та західному "слідах" радіоактивних випадін; радіаційного стану приземного шару атмосфери зони відчуження у ближній та дальній зонах ЧАЕС, його динаміки протягом 2025 року та зафіксованих перевищень контрольних рівнів радіоактивного забруднення; поверхневих вод, які залишаються найбільш вагомим джерелом винесення радіонуклідів за межі зони відчуження; радіаційного стану підземних вод четвертинного, еоценового та сеноман-нижньокрейдового водоносних горизонтів та комплексів; змін розподілу радіонуклідів у межах семи з 15 ландшафтних полігонів. У порівнянні з 2024 роком, середньорічне значення об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у приземному шарі атмосфери ЗВ залишилося приблизно на тому ж рівні або незначно знизилося. У 2025 році винесення  $^{90}\text{Sr}$  р. Прип'ять у створі м. Чорнобиль було в 3,2 раза меншим за таке у 2024 р. та в 2,5 раза меншим за середнє значення останніх 5 років. Надходження  $^{90}\text{Sr}$  із-за меж зони відчуження не перевищувало 32% від загального винесення р. Прип'ять. Вміст  $^{90}\text{Sr}$  зафіксовано в усіх спостережних свердловинах. Максимальні значення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у водах четвертинного водоносного комплексу були зафіксовані в районах старої Будбази, озера Азбучин, Янівського затону, і становили 140, 66, 57 Бк/дм<sup>3</sup>.

**Ключові слова:** радіаційно-екологічний моніторинг, радіаційний стан навколишнього середовища, зона відчуження.

### ВСТУП

Відповідно до статті 13 Закону України "Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи" моніторинг стану природного середовища відноситься до обов'язкових заходів, які здійснюються в зонах відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення. Радіаційно-екологічний моніторинг (РЕМ) на території зони відчуження (ЗВ) здійснюється підрозділами ДСП "Екоцентр" шляхом виконання Регламенту (2017).

**Завдання** радіаційно-екологічного моніторингу на території ЗВ:

- вивчення загальних закономірностей перерозподілу радіонуклідів у довкіллі з урахуванням неоднорідності первинного забруднення, ландшафтно-геохімічних, метеорологічних та інших природних умов та антропогенної діяльності;
- контроль виносу радіоактивних речовин за межі ЗВ, відстеження та контроль радіаційного стану

окремих елементів довкілля при надзвичайних ситуаціях (НС);

- контроль радіаційно-небезпечних об'єктів поводження з РАВ;
- радіаційний контроль із метою дозиметричного супроводження персоналу та відвідувачів ЗВ, "самопоселенців".

**Методика.** Розміщення точок контролю на території нерівномірне і залежить від радіаційних, ландшафтно-геохімічних та виробничо-побутових факторів. Періодичність вимірювань визначається в залежності від контрольованого параметра та засобів вимірювання і змінюється від 1 разу за годину (потужність еквівалента амбієнтної дози гамма-випромінювання (ПЕАД) у системі автоматизованої системи контролю радіаційного стану (АСКРС) до 1 разу за рік (вміст радіонуклідів у компонентах ландшафту), а в частині регламенту моніторингу підземних вод зі спостережних свердловин, змінюється від 1 разу на місяць, до 1 разу на квартал, та

1 разу на півроку, в залежності від розташування, тобто об'єкту спостереження.

РЕМ включає в себе визначення: потужності еквівалента амбієнтної дози гамма-випромінювання, щільності забруднення ґрунту, концентрації радіонуклідів у приземному шарі атмосфери, інтенсивності випадіння радіонуклідів із атмосфери, концентрації радіонуклідів у поверхневих, підземних, питних та стічних водах, біологічних об'єктах (рослинність, гриби, риба та ін.) а також здійснення вимірювань окремих гідрологічних параметрів.

У 2025 році радіаційно-екологічний моніторинг ЗВ проводиться відповідно до актуального Регламенту за виключенням об'єктів, на яких у зв'язку з відсутністю безпечного доступу проведення робіт тимчасово неможливе.

До об'єктів, на яких у 2025 році не поновлено радіаційно-екологічний моніторинг, відносяться: об'єкти розташовані на лівобережній частині басейна р. Прип'ять (спостережні свердловини в районі Лівобережного польдера, водні об'єкти, пункти АСКРС), об'єкти з обмеженим доступом розташовані на правобережній частині р. Прип'ять: свердловини на ПЗРВ "Чистоголівка"; ПТЛРВ "Рудий ліс" (район с. Лісового) 172/Q1; 172/Q2; 172/Q3; Водоймище-охолоджувач ПК-14 — 3; 3А; 3Б; Режимна мережа Прип'ятського водозабору –185/Q1; 185/Q2; 185/Q3; 506; 511; Семиходський старик — К-3; р-он оз. Аз-

бучин — 1; 1А;), АСКРС "Буряківка"; АСКРС "Бенівка" та річка Сахан.

### ПОТУЖНІСТЬ ЕКВІВАЛЕНТА АМБІЄНТНОЇ ДОЗИ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗА ДАНИМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ РАДІАЦІЙНОГО СТАНУ

Потужність еквівалента амбієнтної дози гамма-випромінювання (ПЕАД) є одним із важливих показників, що характеризує радіаційний стан у зоні відчуження.

Мережа моніторингу ПЕАД у зоні відчуження складається з 39 постів АСКРС (рис. 1). Характеристики ПЕАД гамма-випромінювання, що реєструвалися на постах моніторингу АСКРС протягом 2025 року у порівнянні з середньорічними значеннями за 2024 рік та контрольними рівнями (КР) наведені у табл. 1.

ПЕАД гамма-випромінювання у ЗВ зараз майже повністю формується гамма-випромінюванням  $^{137}\text{Cs}$ , що виникає внаслідок його радіоактивного розпаду. Основним джерелом випромінювання є верхній шар ґрунтів, де запаси цього радіонукліду знаходяться в динамічній рівновазі завдяки його включення в кругообіг речовини "ґрунт – рослина – ґрунт". Доля  $^{137}\text{Cs}$ , який мігрує до інших середовищ (повітря, вода, біологічні об'єкти), має порівняно невеликий внесок у формування ПЕАД.

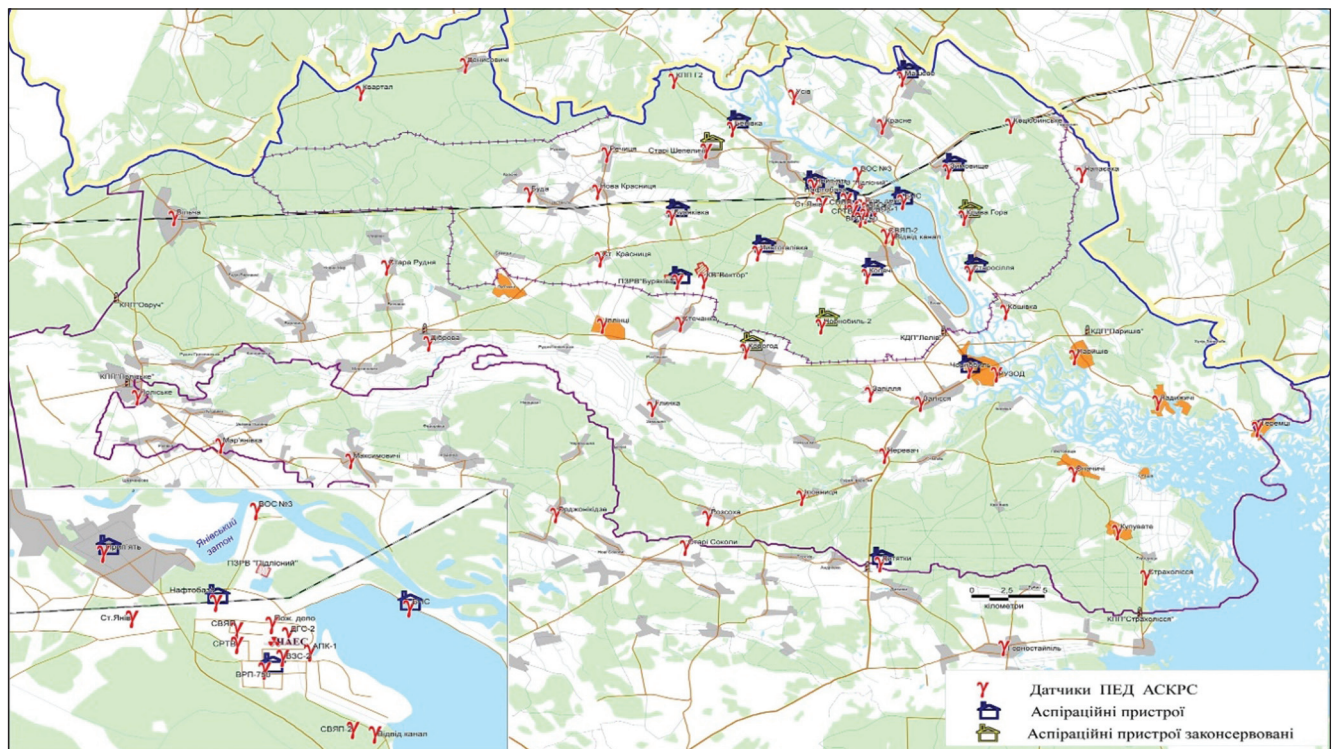


Рис. 1. Картосхема мережі моніторингу ПЕАД у зоні відчуження

Таблиця 1. Потужність еквівалента амбієнтної дози гамма-випромінювання на постах АСКРС у 2025 році, нЗв/год, у порівнянні із середніми значеннями 2024 р.

| № з/п                                   | Назва пункту     | Мінімальне значення | Середнє значення | Максимальне значення | Середнє значення за 2024 рік | Контрольний рівень |
|---|------------------|---------------------|------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|
| <i>Промисловий майданчик ДСП "ЧАЕС"</i> |                  |                     |                  |                      |                              |                    |
| 1                                       | ДГС-2            | 3100                | 3700             | 4200                 | 5600                         | 7500**             |
| 2                                       | ВЗС-2            | 4000                | 5000             | 6100                 | 5200                         | 15000**            |
| 3                                       | СРТВ             | 2400                | 2900             | 3600                 | 2900                         | 15000**            |
| 4                                       | Нафтобаза        | 3600                | 4400             | 4700                 | 4500                         | 13500              |
| 5                                       | СВЯП             | 1400                | 1900             | 2400                 | 2000                         | 15000**            |
| 6                                       | БНС              | 1300                | 1600             | 1800                 | 1600                         | 5000               |
| 7                                       | Пожежне депо     | 1300                | 1600             | 1700                 | 1600                         | 4800               |
| 8                                       | ВРП-750          | 850                 | 1000             | 1200                 | 1100                         | 15000**            |
| 9                                       | АПК-1            | 340                 | 400              | 460                  | 420                          | 7500**             |
| 10                                      | Відвідний канал  | 290                 | 360              | 420                  | 360                          | 1100               |
| 11                                      | ВОС № 3          | 200                 | 260              | 330                  | 250                          | 800                |
| 12                                      | СВЯП-2           | 170                 | 210              | 270                  | 220                          | 550                |
| <i>5-км зона</i>                        |                  |                     |                  |                      |                              |                    |
| 13                                      | Чистоголівка     | 580                 | 710              | 920                  | 730                          | 2300               |
| 14                                      | Копачі           | 120                 | 580              | 670                  | 600                          | 1900               |
| 15                                      | Станція Янів     | 440                 | 560              | 650                  | 540                          | 1700               |
| 16                                      | Прип'ять         | 350                 | 440              | 540                  | 460                          | 1500               |
| <i>10-км зона</i>                       |                  |                     |                  |                      |                              |                    |
| 17                                      | Буряківка*       | —                   | —                | —                    | —                            | 7500               |
| 18                                      | Усів*            | —                   | —                | —                    | —                            | 3600               |
| 19                                      | Машево*          | —                   | —                | —                    | 720                          | 2200               |
| 20                                      | Зимовище         | 500                 | 670              | 780                  | —                            | 2100               |
| 21                                      | Красне*          | —                   | —                | —                    | —                            | 2000               |
| 22                                      | Крива Гора       | 250                 | 270              | 620                  | 360                          | 1200               |
| 23                                      | ПЗРВ "Буряківка" | 330                 | 400              | 480                  | 450                          | 1100               |
| 24                                      | Чорнобиль-2      | 250                 | 300              | 350                  | 320                          | 840                |
| 25                                      | Ст. Шепеличі*    | —                   | —                | —                    | —                            | 740                |
| 26                                      | Бенівка          | 150                 | 200              | 270                  | 210                          | 600                |
| 27                                      | Старосілля       | 140                 | 190              | 260                  | 180                          | 460                |
| 28                                      | Вектор           | 99                  | 120              | 180                  | 130                          | 270                |
| <i>30-км зона</i>                       |                  |                     |                  |                      |                              |                    |
| 29                                      | Діброва          | 166                 | 210              | 250                  | 210                          | 700                |
| 30                                      | Вільча*          | —                   | —                | —                    | —                            | 470                |
| 31                                      | Іловниця         | 104                 | 108              | 158                  | 132                          | 380                |
| 32                                      | Іллінці          | 85                  | 113              | 187                  | 108                          | 260                |
| 33                                      | Корогод          | 83                  | 103              | 161                  | 104                          | 260                |
| 34                                      | Паришів          | 84                  | 118              | 181                  | 128                          | 250                |
| 35                                      | Дитятки          | 103                 | 131              | 183                  | 126                          | 220                |
| 36                                      | Купувате         | 96                  | 101              | 178                  | 109                          | 220                |
| <i>м. Чорнобиль</i>                     |                  |                     |                  |                      |                              |                    |
| 37                                      | Поліклініка      | 120                 | 190              | 230                  | 210                          | 550                |
| 38                                      | РУЗОД            | 140                 | 170              | 210                  | 170                          | 370                |
| <i>За межами зони відчуження</i>        |                  |                     |                  |                      |                              |                    |
| 39                                      | Славутич         | 100                 | 130              | 170                  | 130                          | 300                |

Примітки: \* — дані відсутні з технічних причин (сервісне обслуговування); \*\* — контрольні рівні встановлені на території ДСП "Чорнобильська АЕС", відповідно до документу "Контрольні рівні радіаційної безпеки (41П-С)".

На фоні загального зниження потужності дози простежується її сезонна динаміка, що проявляється зменшенням ПЕАД у зимовий період під час формування снігового покриву.

### РАДІАЦІЙНИЙ СТАН ПРИЗЕМНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ

У 2025 році спостереження за радіаційним станом повітряного простору ЗВ проводилися у межах двох основних напрямів: оцінка об'ємної активності радіонуклідів в приземному шарі атмосфери на пунктах контролю (АСКРС) ближньої (5 км навколо ЧАЕС) та дальньої зони (вся решта території ЗВ, у тому числі місця найбільш тривалого перебування персоналу ЗВ — м. Чорнобиль і КДП "Дитятки"); моніторинг інтенсивності випадінь радіонуклідів із атмосфери на пунктах спостереження ЗВ.

Відбір проб у 2025 році на пунктах частково відновленої мережі спостереження здійснювався за допомогою аспіраційних пристроїв АУРА 02.11. Проби радіоактивних аерозолів відбиралися шляхом безперервного прокачування повітря через фільтри з тканини Петрянова (ФПП-15-1,5) і заміною їх через кожні 5–7 діб.

Проби випадінь із атмосфери відбиралися на пунктах частково відновленої системи спостережень. Для відбору проб випадінь із атмосфери використовувалися планшети площею 0,312 м<sup>2</sup>, встановлені на висоті 1 м над поверхнею ґрунту з марлевым фільтруючим матеріалом. Час експозиції планшетів — від 10 до 20 діб. Проби в кожному пункті відбиралися 2 рази на місяць і всі надсилалися на гамма-спектрометричний аналіз.

Кількість опадів у 2025 р. була неістотно вищою за середні багаторічні значення, Підвищена кіль-

кість опадів спостерігалася у квітні, травні та липні, тоді як більша частина місяців була посушливою (30–90% від середніх багаторічних значень). Періодично сильні пориви вітру сприяли розвитку дефляційних процесів у ЗВ.

Інтервали змін та середні значення об'ємної активності <sup>137</sup>Cs у повітрі районів розміщення пунктів спостережень протягом 2025 року наведені в *табл. 2*.

Найвищі значення об'ємної активності <sup>137</sup>Cs у приземному шарі атмосфери ЗВ зареєстровані на пунктах контролю ближньої зони, де вони коливалися в діапазоні 3,0E-06–7,6E-04 Бк/м<sup>3</sup>, хоча перевищень контрольних рівнів (КР) забруднення повітря <sup>137</sup>Cs зафіксовано не було (згідно гігієнічних нормативів "Основні контрольні рівні...", 2013). Максимальне значення об'ємної активності <sup>137</sup>Cs у повітрі ближньої зони зафіксовано на АСКРС ВРП-750 у квітні (*рис. 2*).

Серед пунктів контролю на частково відновленій мережі спостережень *дальньої зони* (10-км навколо ЧАЕС) найвищі значення об'ємної активності <sup>137</sup>Cs в повітрі були зафіксовані у травні на АСКРС Чистогалівка. На пунктах спостереження АСКРС дальньої зони перевищення КР об'ємної активності <sup>137</sup>Cs у пробах повітря не зафіксовано.

У місцях найбільш тривалого перебування персоналу ЗВ об'ємна активність <sup>137</sup>Cs у повітрі становила: м. Чорнобиль — від 1,0E-06 до **8,1E-05** Бк/м<sup>3</sup> на КДП Дитятки — від 6,4E-07 до 8,8E-05 Бк/м<sup>3</sup> без перевищення КР забруднення повітря (*рис. 3, 4*).

На пункті спостереження АСКРС Чорнобиль об'ємна активність <sup>137</sup>Cs досягла контрольного рівня (КР=**8,0E-05** Бк/м<sup>3</sup>) у пробі повітря від 29.04.2025. Імовірною причиною є високий трафік автомобілів,

Таблиця 2. **Об'ємна активність <sup>137</sup>Cs у приземному шарі атмосфери на пунктах контролю ДСП "Екоцентр" у 2025 році, Бк/м<sup>3</sup>**

| Пункт контролю     | Віддаленість, азимут | Мінімальна | Середня | Максимальна |
|--------------------|----------------------|------------|---------|-------------|
| <i>Ближня зона</i> |                      |            |         |             |
| ВРП-750            | 0,8 км; 180°         | 3,0E-05    | 3,2E-04 | 7,6E-04     |
| Нафтобаза          | 2 км; 330°           | 1,4E-05    | 1,4E-04 | 3,7E-04     |
| Прип'ять           | 3,1 км; 290°         | 4,6E-06    | 4,4E-05 | 4,5E-04     |
| БНС                | 2,6 км; 85°          | 3,0E-06    | 8,5E-05 | 3,4E-04     |
| <i>Дальня зона</i> |                      |            |         |             |
| Копачі             | 5 км; 155°           | 1,5E-06    | 4,7E-05 | 2,6E-04     |
| Чорнобиль          | 16 км; 147°          | 1,0E-06    | 1,2E-05 | 8,1E-05     |
| Дитятки            | 32 км; 175°          | 6,4E-07    | 7,9E-06 | 8,8E-05     |
| Чистогалівка       | 7 км; 240°           | 1,8E-06    | 6,5E-05 | 4,1E-04     |
| Корогод            | 13,6 км; 208°        | 7,3E-06    | 1,2E-05 | 9,4E-05     |
| ПЗРВ "Буряківка"   | 12,5 км; 250°        | 2,7E-06    | 2,7E-05 | 1,1E-04     |

*Примітка.* В таблиці запис вигляду 1,0E-02 означає  $1 \times 10^{-2}$ .

що супроводжується підняттям у повітря пилю і початок цвітіння сосни звичайної.

У повітрі виробничого об'єкту ПЗРВ "Буряківка" об'ємна активність  $^{137}\text{Cs}$  змінювалася у діапазоні від  $2,7\text{E}-06$  до  $1,1\text{E}-04$  Бк/м<sup>3</sup> без перевищення КР.

Інтенсивність випадінь  $^{137}\text{Cs}$  із приземного шару атмосфери на пунктах системи спостережень ЗВ у 2025 році коливалась: у ближній зоні від 0,02 до 8,2 Бк/(м<sup>2</sup>×добу), в середньому склала 0,29 Бк/(м<sup>2</sup>×добу), у дальній зоні — від 0,01 до 3,5 Бк/(м<sup>2</sup>×добу), в середньому — 0,11 Бк/(м<sup>2</sup>×добу).

Протягом 2025 року було виявлено ряд загорань у районах Бенівського, Дібровського, Денисовецького, Корогодського, Котовського, Купуватського, Луб'янського, Паришівського, Поліського, Розсохського, Яковецького природоохоронних науково — дослідних відділень Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника, Корогодського лісництва, в сс. Теремці та Бички, м. Чорнобиль, на загальній площі близько 950 га, які носили локальний характер. За даними радіаційної розвідки (за допомогою аспіраційного та дозиметричного обладнання) максимальна об'ємна активність радіонуклідів у повітрі на лінії вогню була зафіксована у Розсохському лісництві під час лісової пожежі 09.07.2025 на рівні  $1,14\text{E}-02$  Бк/м<sup>3</sup>, що перевищує значення контрольного рівня (Основні контрольні рівні...", 2013) у 54,3 раза (**КР  $2,1\text{E}-04$  Бк/м<sup>3</sup>**).

14.02.2025 р. о 02:00 год. було виявлено пожежу на радіаційно-небезпечному об'єкті "новий безпечний конфайнмент" ЧАЕС. Враховуючи радіологічну значимість пожежі, був посилений контроль за радіаційною ситуацією. У період пожежі була задіяна мобільна оперативна група ДСП "Екоцентр" із аспіраційним та дозиметричним обладнанням. За період з 12 по 18 лютого 2025 року перевищення КР об'ємної активності радіонуклідів у приземному шарі атмосфери на стаціонарних постах спостереження АСКРС ближньої зони та на проммайданчику ЧАЕС не було зафіксовано.

В цілому, радіаційний стан приземного шару атмосфери ЗВ та його динаміка протягом 2025 року визначалися характером поверхневого забруднення території, техногенними та біологічними факторами (пожежі, роботи на радіоактивно забруднених територіях, цвітінням сосни звичайної), метеорологічними умовами.

### РАДІАЦІЙНИЙ СТАН ПОВЕРХНЕВИХ ВОД

Протягом 2025 року моніторинг води р. Прип'ять на вході до ЗВ не проводився.

Вміст  $^{90}\text{Sr}$  у воді ріки біля м. Чорнобиль протягом року в середньому склав 54 Бк/м<sup>3</sup>. Максимальне

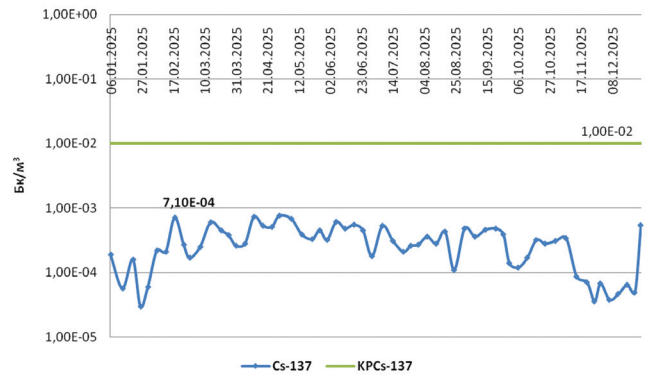


Рис. 2. Динаміка об'ємної активності (Бк/м<sup>3</sup>)  $^{137}\text{Cs}$  в приземному шарі повітря на АСКРС ВРП-750 у 2025 р.

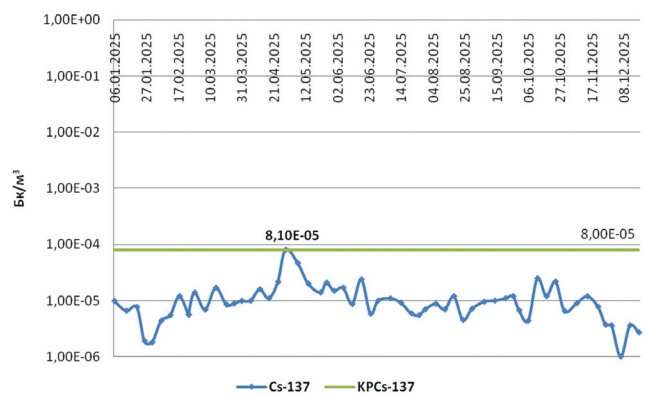


Рис. 3. Динаміка об'ємної активності (Бк/м<sup>3</sup>)  $^{137}\text{Cs}$  в приземному шарі повітря на АСКРС Чорнобиль у 2025 р.

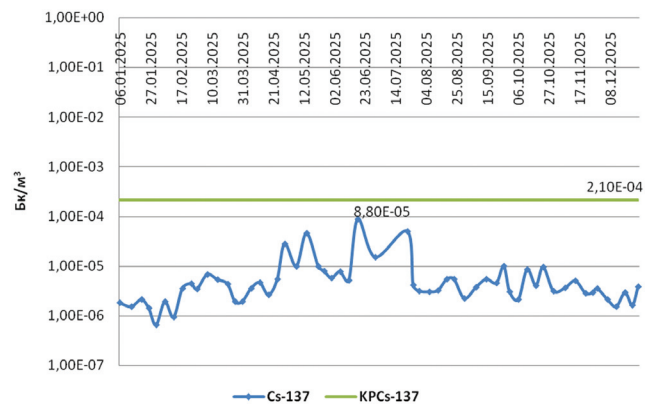


Рис. 4. Динаміка об'ємної активності (Бк/м<sup>3</sup>)  $^{137}\text{Cs}$  в приземному шарі повітря на АСКРС Дитятки в 2025 р.

значення ( $160$  Бк/м<sup>3</sup>) зафіксоване 17 червня, а мінімальне ( $32$  Бк/м<sup>3</sup>) — 16 грудня. В цілому динаміка вмісту радіонуклідів у воді річки виявилась подібною до попередніх 5 років (табл. 3).

Значення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у воді контрольованих водотоків у середньому були на рівні або нижче багаторічних (табл. 4).

Таблиця 3. **Об'ємна активність (Бк/м<sup>3</sup>) та винесення <sup>137</sup>Cs і <sup>90</sup>Sr (Тбк) р. Прип'ять в створі м. Чорнобиль у 2005–2025 рр.**

| Рік         | Середня річна витрата води, м <sup>3</sup> /с | Радіонукліди      |             |                  |             | Винесення         |                  |
|-------------|---|-------------------|-------------|------------------|-------------|-------------------|------------------|
|             |   | <sup>137</sup> Cs |             | <sup>90</sup> Sr |             | <sup>137</sup> Cs | <sup>90</sup> Sr |
|             |   | Середня           | Максим.     | Середня          | Максим.     |                   |                  |
| 2005        | 492   | 0,07              | 0,16        | 0,19             | 0,50        | 1,39              | 3,70             |
| 2006        | 406   | 0,07              | 0,11        | 0,16             | 0,30        | 0,92              | 1,94             |
| 2007        | 394   | 0,05              | 0,15        | 0,12             | 0,27        | 0,67              | 1,38             |
| 2008        | 486   | 0,01              | 0,13        | 0,10             | 0,29        | 0,60              | 1,42             |
| 2009        | 483   | 0,03              | 0,10        | 0,11             | 0,36        | 0,50              | 1,51             |
| 2010        | 512   | 0,05              | 0,15        | 0,11             | 0,39        | 0,87              | 2,21             |
| 2011        | 453   | 0,05              | 0,15        | 0,10             | 0,17        | 0,68              | 1,40             |
| 2012        | 351   | 0,04              | 0,09        | 0,08             | 0,18        | 0,44              | 0,87             |
| 2013        | 642   | 0,07              | 0,34        | 0,17             | 0,68        | 1,89              | 5,01             |
| 2014        | 352   | 0,06              | 0,32        | 0,11             | 0,54        | 0,56              | 1,08             |
| 2015        | 170   | 0,04              | 0,09        | 0,09             | 0,16        | 0,22              | 0,41             |
| 2016        | 273   | 0,04              | 0,10        | 0,09             | 0,18        | 0,24              | 0,66             |
| 2017        | 384   | 0,03              | 0,07        | 0,06             | 0,14        | 0,40              | 0,72             |
| 2018        | 405   | 0,05              | 0,21        | 0,09             | 0,26        | 0,64              | 1,15             |
| 2019        | 243   | 0,03              | 0,05        | 0,05             | 0,13        | 0,25              | 0,36             |
| 2020        | 193   | 0,02              | 0,13        | 0,04             | 0,07        | 0,13              | 0,25             |
| 2021        | 340   | 0,01              | 0,03        | 0,06             | 0,10        | 0,22              | 0,55             |
| 2022*       | 367   | 0,03              | 0,08        | 0,08             | 0,13        | 0,43              | 0,93             |
| 2023        | 540   | 0,06              | 0,15        | 0,09             | 0,17        | 0,96              | 1,53             |
| 2024        | 521   | 0,05              | 0,15        | 0,09             | 0,34        | 0,76              | 1,15             |
| <b>2025</b> | <b>215</b>                                    | <b>0,02</b>       | <b>0,06</b> | <b>0,05</b>      | <b>0,16</b> | <b>0,16</b>       | <b>0,36</b>      |
| 1986–2025   | 402   | 0,15              | 18          | 0,31             | 12          | 139,18            | 189,15           |

Примітки: У таблиці запис подається у Тбк, де 1 Тбк = 1012 Бк; "—" — значення відсутні; \* — розрахункові дані.

Таблиця 4. **Результати вимірювання об'ємної активності <sup>137</sup>Cs та <sup>90</sup>Sr у воді контрольованих водотоків та водойм зони відчуження у 2025 році, Бк/м<sup>3</sup>**

| Об'єкт та пункт контролю                     | <sup>137</sup> Cs |       |         |        |       |         | <sup>90</sup> Sr |        |         |
|--|-------------------|-------|---------|--------|-------|---------|------------------|--------|---------|
|  | Завись            |       |         | Розчин |       |         | Мінім.           | Макс.  | Середня |
|  | Мінім.            | Макс. | Середня | Мінім. | Макс. | Середня |                  |        |         |
| р. Прип'ять — с. Усів**                      | —                 | —     | —       | —      | —     | —       | —                | —      | —       |
| р. Прип'ять — м. Чорнобиль                   | 4,5               | 31    | 13      | 3,8    | 28    | 11      | 32               | 160    | 54      |
| р. Уж — с. Черевач                           | 3,0               | 47    | 17      | 11     | 49    | 23      | 38               | 130    | 70      |
| р. Брагінка — дамба № 39***                  | —                 | —     | —       | —      | —     | —       | —                | —      | —       |
| р. Сахан — с. Новошепеличі*                  | 5,0               | 210   | 21      | 38     | 320   | 90      | 84               | 3900   | 810     |
| р. Глиниця*                                  | 15                | 35    | 25      | 59     | 430   | 130     | 540              | 4800   | 1900    |
| Водойма — охолоджувач ЧАЕС                   | 20                | 5400  | 530     | 210    | 6300  | 1300    | 740              | 16000  | 4900    |
| Семиходський старик                          | 38                | 200   | 89      | 280    | 690   | 490     | 1100             | 7100   | 3300    |
| Янівський затон                              | 32                | 180   | 69      | 420    | 1200  | 900     | 970              | 6400   | 3500    |
| оз. Азбучин                                  | 140               | 990   | 440     | 1900   | 7000  | 5000    | 63000            | 208000 | 173000  |
| Відвідний канал 3 черги ЧАЕС*                | 230               | 1500  | 820     | 39000  | 52000 | 44500   | 2900             | 10000  | 7400    |
| Лівобережний польдер — верхній б'єф ГТС № 7* | 29                | 180   | 100     | 350    | 1100  | 720     | 3300             | 6700   | 5000    |
| оз. Глибоке                                  | 110               | 250   | 180     | 1200   | 4900  | 3400    | 27600            | 90000  | 62000   |

Примітки: \* — за період стоку; \*\* — після 24 лютого 2022 року моніторинг не проводився через відсутність доступу; \*\*\* — з лютого 2023 року моніторинг не проводився через відсутність доступу.

Винесення  $^{90}\text{Sr}$  з водою р. Прип'ять у створі м. Чорнобиль у 2025 році за розрахунковими даними склало 0,36 ТБк, що менше в 3,2 раза за винесення 2024 року та в 2,5 раза середнього значення за останні 5 років. Зменшення винесення залежить від водності року, ступеню заглиблення радіонуклідів та заходів спрямованих на забезпечення функціонування водоохоронних споруд, розташованих на лівому та правому березі р. Прип'ять.

Вміст радіонуклідів у воді р. Уж був на рівні минулорічних значень, та дещо збільшувався під час водопілля. Згідно розрахунків винесення  $^{90}\text{Sr}$  з водою р. Уж склало 0,02 ТБк, що в три рази менше значення за 2024 р. Всього з поверхневими водами в Київське водосховище винесено 0,41 ТБк  $^{90}\text{Sr}$ . Внесок р. Прип'ять в загальне винесення  $^{90}\text{Sr}$  в Київське водосховище становив 88%, р. Уж — 5%, р. Брагінка — 7% (табл. 5).

У 2025 році в балансі джерел формування радіонуклідного забруднення р. Прип'ять (в річному розрізі) надходження  $^{90}\text{Sr}$  із-за меж зони відчуження не перевищувало 32% від загального винесення рікою.

У межах ЗВ домінуючою складовою, яка формувала винесення радіонуклідів були ґрунтові води (загалом 49% величини винесення), як основне джерело формування винесення у 2025 році. Така частка участі ґрунтових вод у водному винесенні  $^{90}\text{Sr}$  добре кореспондується з оцінками та прогнозами виконаними в роботі (Шевченко та ін., 2023), де внесок ґрунтових вод у забруднення поверхневого

стоку магістральних каналів осушувальних систем та річок на 20-ті роки оцінюється у 47%.

Величина винесення  $^{137}\text{Cs}$  за 2025 рік у створі м. Чорнобиль склала 0,16 ТБк (у 2024 р. — 0,76 ТБк).

Вміст  $^{137}\text{Cs}$  у воді малих річок ЗВ за періоди наявності стоку був на рівнях, близьких до показників останніх років. У воді більшості замкнутих водойм та водойми-охолоджувачі ЧАЕС (далі — ВО), максимум  $^{137}\text{Cs}$  прослідковується у літні місяці. Сезонні коливання вмісту розчиненого  $^{137}\text{Cs}$ , імовірно, обумовлені циклічністю фізико-хімічних та біологічних процесів у ВО протягом року.

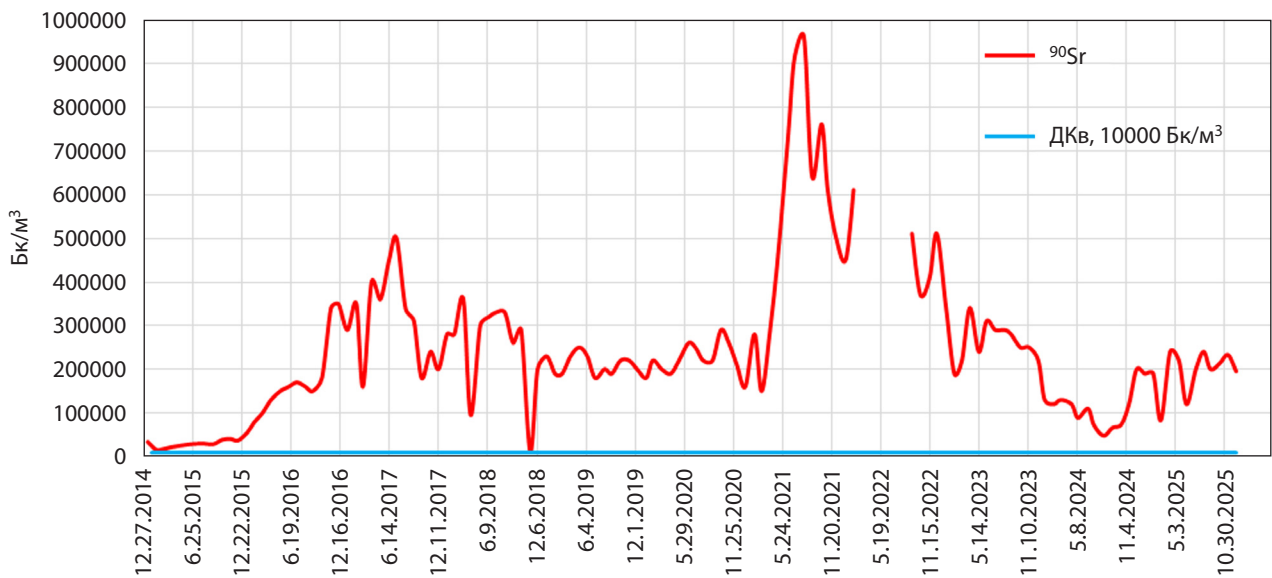
За дослідженнями фахівців Українського гідрометеорологічного інституту, динаміка розподілення радіонуклідів у замкнутих водоймах контролюється виключно геохімічними і гідравлічними чинниками, власне коливаннями рівнів води в самих озерах та прилеглих територіях, які гідравлічне з ними пов'язані. Влітку внаслідок формування відновлювальних умов у придонному шарі води спостерігається посилення дифузійного потоку  $^{137}\text{Cs}$  із донних відкладів у водну товщу. Восени у ВО зростає концентрація завислих наносів, які сорбують цезій з водного розчину і з осадами повертають його назад у донні відклади.

Серед контрольованих водних об'єктів максимальні сумарні значення об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  (розчин та завись) характерні для відповідного каналу 3-ї черги ЧАЕС (52500 Бк/м<sup>3</sup>), підвідного каналу водойми-охолоджувача ЧАЕС (9700 Бк/м<sup>3</sup>), озер Глибоке (5000 Бк/м<sup>3</sup>) та Азбучин (7200 Бк/м<sup>3</sup>).

Таблиця 5. **Винесення  $^{90}\text{Sr}$  основними водотоками зони відчуження та іншими джерелами у 2016–2025 рр., ТБк**

| № з/п | Об'єкт — створ   | Роки |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|--|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       |  | 2016 | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  | 2021  | 2022* | 2023* | 2024* | 2025* |
| 1     | р. Прип'ять, вхід в зону   | 0,29 | 0,35  | 0,46  | 0,19  | 0,11  | 0,30  | 0,34  | 0,57  | 0,43  | 0,13  |
| 2     | р. Сахан   | 0,01 | 0,008 | 0,02  | 0,004 | 0,001 | 0,014 | 0,015 | 0,024 | 0,019 | 0,007 |
| 3     | Стік з лівобережного польдера  | 0,02 | 0,04  | 0,07  | 0,008 | 0,001 | 0,005 | 0,02  | 0,034 | 0,026 | 0,008 |
| 4     | р. Глиниця   | 0,03 | 0,02  | 0,006 | 0,008 | 0,008 | 0,006 | 0,013 | 0,015 | 0,015 | 0,011 |
| 5     | Фільтрація з затонів, надходження з ґрунтовими водами, надходження з заплави | 0,31 | 0,27  | 0,61  | 0,15  | 0,13  | 0,23  | 0,54  | 0,89  | 0,66  | 0,20  |
| 6     | р. Прип'ять — м. Чорнобиль   | 0,66 | 0,72  | 1,15  | 0,36  | 0,25  | 0,55  | 0,93  | 1,53  | 1,15  | 0,36  |
| 7     | Надходження $^{90}\text{Sr}$ в межах зони відчуження, ТБк                    | 0,37 | 0,37  | 0,69  | 0,17  | 0,14  | 0,25  | 0,59  | 0,96  | 0,72  | 0,23  |
|       | доля зони відчуження, %  | 56   | 51    | 60    | 47    | 56    | 45    | 63    | 63    | 62    | 63    |
| 8     | р. Уж  | 0,04 | 0,05  | 0,07  | 0,02  | 0,01  | 0,03  | 0,05  | 0,12  | 0,06  | 0,02  |
| 9     | р. Брагінка  | 0,05 | 0,14  | 0,17  | 0,03  | 0,01  | 0,04  | 0,08  | 0,13  | 0,10  | 0,03  |
| 10    | Винос в Київське водосховище: р. Прип'ять + р. Уж + р. Брагінка              | 0,75 | 0,91  | 1,39  | 0,41  | 0,27  | 0,62  | 1,06  | 1,78  | 1,31  | 0,41  |

Примітка: \* — дані отримані розрахунковим методом із урахуванням результатів багаторічних спостережень.



**Рис. 5.** Динаміка об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у воді оз. Азбучин у 2014–2025 рр. Дані за період з початку окупації ЗВ і до відновлення функціонування системи моніторингу відсутні (2022 рік)

Найбільш забрудненим радіонуклідами водним об'єктом є оз. Азбучин, максимальні значення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  у воді знаходяться на рівні  $240000 \text{ Бк/м}^3$  та  $7200 \text{ Бк/м}^3$  відповідно. Вода у озері за вмістом  $^{90}\text{Sr}$  відповідає категорії радіоактивних відходів згідно з критеріями установленими в ОСПУ-2005 (п. 15.1.6, 15.1.7).

Відзначимо, що значне зростання об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у воді озера Азбучин, яке почалось із 2015 року, припинилось у 2021 р. Проте, наступне зниження активності, яке відбувалось до 2024 р., знову змінилось зростанням у 2025 р. (рис. 5). Імовірним чинником формування підвищених рівнів є надходження мобільних форм радіонуклідів у водне середовище з осушених ділянок донних відкладів і мілководдя, що зумовлено зниженням рівня води в озері з позначки 107,50 мБС до мінімального значення 103,75 мБС (2017 р.) після спуску водоймища-охолоджувача, і у зв'язку із цим трансформацією гідродинамічного режиму гідравлічно пов'язаних із водоймою підземних вод.

Рівень води водойми-охолоджувача почав знижуватися після зупинення роботи берегової насосної станції (БНС) у 2014 році, і протягом перших двох років це відбувалося швидко і безперервно з високими темпами фільтрації через тіло насипної піщаної дамби і до середини 2017 року фільтраційні втрати були фактично основною причиною зменшення рівня води, а з 2018 р. зниження рівня обумовлено переважно випаровуванням. У 2019–2025 роках рівневий режим водоймища змінювався в залежності від рівня води р. Прип'ять, з якою ВО гідравлічно пов'язане, а також фільтраційних про-

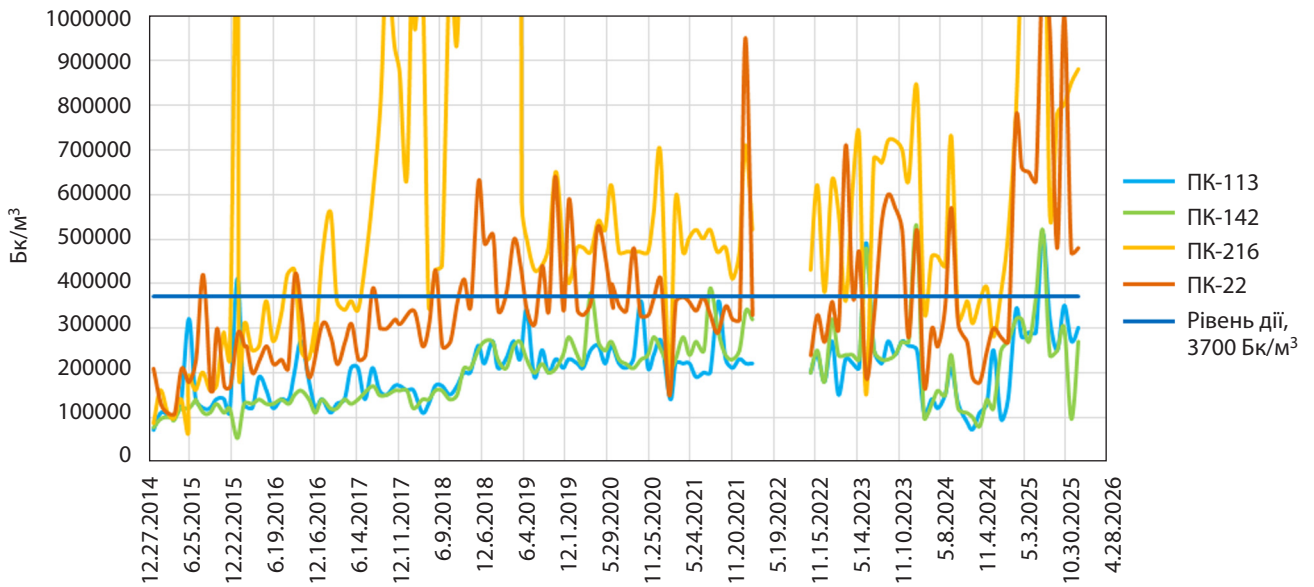
цесів та випаровування з дзеркала водної поверхні. У результаті кліматичних змін останніх років, які характеризувалися посушливим літом, практично безсніжними зимовими періодами, в межах чаші водойми-охолоджувача утворилася нова система водних об'єктів, у яких формується власний гідрологічний режим і умови забруднення радіонуклідами (рис. 6, 7).

Протягом 2025 року рівень води водойми-охолоджувача в цілому знизився на 25 см.

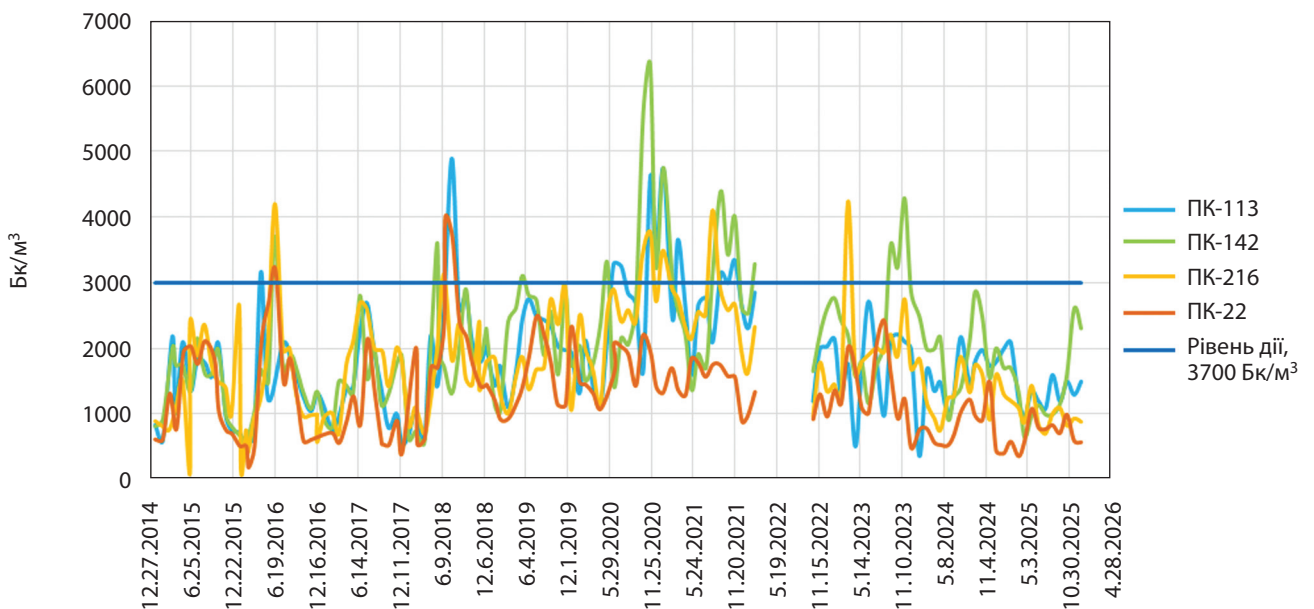
Рівні дії вказані відповідно до Гігієнічних нормативів "Основні контрольні рівні, рівні звільнення та рівні дії щодо радіоактивного забруднення об'єктів зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення", затверджених Головою ДАЗВ України 08.02.2022 року.

Вміст трансуранових елементів ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) (ТУЕ) визначався у воді р. Прип'ять, водойми-охолоджувача ЧАЕС, Янівського затону, Семиходського старика, лівобережного польдеру ГТС № 7 та оз. Глибоке. Найбільша активність  $^{241}\text{Am}$  та сумарної концентрації ізоотопів плутонію зафіксована у воді лівобережного польдеру ГТС № 7 —  $23 \text{ Бк/м}^3$  та  $9,3 \text{ Бк/м}^3$  відповідно. У воді р. Прип'ять об'ємна активність ТУЕ не перевищувала  $3 \text{ Бк/м}^3$ . Допустимий рівень ТУЕ у питній воді згідно НРБУ-97 ДКВ становить  $1000 \text{ Бк/м}^3$ .

Поверхневі води залишаються важливим шляхом вносу радіонуклідів за межі ЗВ. Винесення  $^{90}\text{Sr}$  з водою р. Прип'ять у створі м. Чорнобиль залежить від водності року та бар'єрної функції водоохоронних споруд. У 2025 році водний винос був визначений за вимірними даними та з урахуванням даних отри-



**Рис. 6.** Динаміка об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у воді ВО у 2019–2025 рр. Дані за період з початку окупації ЗВ і до відновлення функціонування системи моніторингу відсутні



**Рис. 7.** Динаміка об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  у воді ВО у 2019–2025 рр.

маних у ході багаторічних спостережень. Винесення  $^{90}\text{Sr}$  р. Прип'ять у створі м. Чорнобиль в 2025 році в 3,2 раза менше за винос 2024 року та в 2,5 раза середнього значення за останні 5 років.

Максимальні значення об'ємної активності радіонуклідів у воді р. Прип'ять та величина їх виносу прямо корелюються з водністю та витратами води, які є похідними від гідродинамічних та метеорологічних факторів.

Сумарне за післяаварійний період винесення  $^{90}\text{Sr}$  становить 189,15 ТБк,  $^{137}\text{Cs}$  — 139,18 ТБк.

## МОНІТОРИНГ РАДІАЦІЙНОГО СТАНУ СТИЧНИХ ВОД

У 2025 році проводився контроль радіаційного стану стічних вод з каналізаційно-очисних споруд (КОС) м. Чорнобиль та ПЗРВ "Буряківка". В усіх пробах води визначалась об'ємна активність  $^{90}\text{Sr}$ ; у пробах із КОС вміст  $^{137}\text{Cs}$  визначався окремо в розчині та на завислих частках, в інших пробах — сумарно.

Проводився відбір проб на вміст радіонуклідів у стічних водах каналізаційно-очисних споруд (КОС)

Таблиця 6. **Об'ємна активність радіонуклідів у стічних та відпрацьованих технологічних водах об'єктів зони відчуження у 2025 році, Бк/м<sup>3</sup>**

| Об'єкт та пункт контролю | <sup>137</sup> Cs |         | <sup>90</sup> Sr |         | Сума середніх значень |
|--------------------------|-------------------|---------|------------------|---------|-----------------------|
|                          | Максимум          | Середнє | Максимум         | Середнє |                       |
| <i>ПЗРВ "Буряківка"</i>  |                   |         |                  |         |                       |
| Резервуар № 1            | 1600              | 570     | 1700             | 1400    | 1970                  |
| Резервуар № 2            | 2100              | 800     | 5300             | 3300    | 4100                  |
| Резервуар № 3            | 2000              | 1400    | 9000             | 6800    | 8200                  |
| <i>КОС м. Чорнобиль</i>  |                   |         |                  |         |                       |
| Випуск в р. Уж           | 430               | 80      | 540              | 120     | 200                   |

м. Чорнобиль (випуск у р. Уж). За результатами моніторингу, сумарна об'ємна активність <sup>137</sup>Cs та <sup>90</sup>Sr в стічних водах була на рівні результатів останніх років, та не перевищувала контрольне значення для суміші цих радіонуклідів, встановлене на рівні 3700 Бк/м<sup>3</sup>. Середньорічне значення склало 210 Бк/м<sup>3</sup>, а максимальне значення не перевищило 920 Бк/м<sup>3</sup>.

У районі розташування ПЗРВ "Буряківка" водоносії та відкриті водойми відсутні. Стічні води ПЗРВ "Буряківка" надходять та тимчасово зберігаються у резервуарах, облицьованих нержавіючою сталлю: вода із санпропускника і господарсько-побутові стоки — в резервуарі № 1, відпрацьована вода з мийки машин — в резервуарі № 2, з майданчика зберігання металевих РАВ — у резервуарі № 3.

Слід зазначити, що згідно з ОСПУ-2005, за вмістом <sup>90</sup>Sr стічні води з резервуара № 3 (більшість проб) мають підстави характеризуватись як рідкі РАВ.

Порівняльний аналіз результатів моніторингу стічних вод (табл. 6) показує, що будь-яка закономірність у змінах об'ємної активності <sup>137</sup>Cs та <sup>90</sup>Sr відсутня. Значення вмісту радіонуклідів визначається режимом роботи технологічного об'єкта.

Максимальні значення об'ємної активності <sup>90</sup>Sr у відпрацьованій технологічній воді на ПЗРВ "Буряківка" близькі до критеріїв віднесення до рідких радіоактивних відходів.

Вміст радіонуклідів у стічних водах, які надходять у р. Уж після очищення на КОС м. Чорнобиль, у 2025 році не перевищував встановлену контрольну концентрацію. Величину річного контрольного скиду радіонуклідів не перевищено.

### РАДІАЦІЙНИЙ СТАН ПІДЗЕМНИХ ВОД

Протягом 2025 року системою радіаційного контролю, як і в попередні роки з початку спостережень, були охоплені підземні води четвертинного, еоценового та сеноман-нижньокрейдового

водоносних комплексів. Мережа моніторингу ґрунтових вод, яка знаходилась на лівому та частково правому березі р. Прип'ять у зв'язку з військовою агресією лишилась недоступною: свердловини на Лівобережному польдері, ПЗРВ "Чистоголівка", режимна мережа прип'ятського водозабору (св. 506, 511, 185Q1 3.), ПТЛРВ "Рудий ліс" (район с. Лісового, свердловини 172/Q1, 172/Q2, 172/Q3).

Радіаційний стан підземних вод водоносного комплексу еоценових відкладів (джерела централізованого водопостачання ЧАЕС) контролювався на діючому водозаборі ЧАЕС (м. Прип'ять), сеноман-нижньокрейдових (основи централізованого водопостачання м. Чорнобиль) — на діючому водозаборі м. Чорнобиль. Крім того, контролювався стан води у водопровідній мережі м. Чорнобиль безпосередньо в місцях її споживання. Основна увага приділялась водоносному комплексу у четвертинних відкладах, який залягає першим від поверхні (ґрунтовий) і є об'єктом безпосереднього впливу техногенного радіаційного забруднення території ЗВ та ПТЛРВ.

Результати досліджень радіаційного стану водоносних комплексів еоценових та сеноман-нижньокрейдових відкладів не дають підстав для однозначного твердження про наявне їх забруднення радіонуклідами аварійного викиду ЧАЕС. Вміст <sup>137</sup>Cs та <sup>90</sup>Sr у воді на водозаборах ЧАЕС (еоценовий) та міста Чорнобиль (сеноман-нижньокрейдових) становить в середньому <2 Бк/м<sup>3</sup> та 5,1 Бк/м<sup>3</sup> відповідно.

За результатами контролю радіаційного стану підземних вод у водопровідних мережах м. Чорнобиль безпосередньо в місцях їх споживання (водоносний комплекс сеноман-нижньокрейдових відкладів) вміст <sup>90</sup>Sr у воді склав в середньому 5,9 Бк/м<sup>3</sup>, <sup>137</sup>Cs — <2 Бк/м<sup>3</sup>. ДР-2006 для питної води за вмістом <sup>90</sup>Sr та <sup>137</sup>Cs — 2000 Бк/м<sup>3</sup> відповідно.

Максимальні значення об'ємної активності <sup>90</sup>Sr у воді контролювано-спостережених свердловин во-

доносного комплексу у четвертинних відкладах були зафіксовані в районах старої Будбази, озера Азбучин, Янівського затону, і становили 140 000, 66 000, 57 000 Бк/м<sup>3</sup> відповідно. Об'ємна активність <sup>90</sup>Sr у воді контрольно-спостережних свердловин К-1, К-3 водоносного комплексу у четвертинних

відкладах Семиходського старику спостерігається в діапазоні значень у межах двох порядків, від 400 до 40000 Бк/м<sup>3</sup>.

У районі с. Лісового у воді свердловин К-13Д максимальна об'ємна активність <sup>137</sup>Cs досягла 25 000 Бк/м<sup>3</sup> (табл. 7). Стабільно високі значення

Таблиця 7. Сезонні коливання та середні значення об'ємної активності <sup>137</sup>Cs та <sup>90</sup>Sr (Бк/м<sup>3</sup>) в ґрунтових водах на основних об'єктах, які контролювались у 2025 році

| Пункт пробовідбору                               | № спостер. свердл. | <sup>137</sup> Cs |       |         | <sup>90</sup> Sr |        |         |
|--|--------------------|-------------------|-------|---------|------------------|--------|---------|
|  |                    | Мін.              | Макс. | Середня | Мін.             | Макс.  | Середня |
| "Рудий ліс" — ПТЛРВ<br>(район ст. Будбази)       | 1/1                | 30                | 78    | 51      | 17000            | 58000  | 42000   |
|  | 2/1                | 13                | 29    | 21      | 15000            | 47000  | 29000   |
|  | 2/1Д               | 5                 | 12    | 8       | 290              | 550    | 450     |
|  | 1/2                | 12                | 31    | 22      | 47000            | 140000 | 88000   |
|  | 2/2                | 56                | 280   | 152     | 1700             | 67000  | 34500   |
| "Рудий ліс" — ПТЛРВ<br>(район с. Лісового)       | К-13               | 7                 | 25    | 17      | 5300             | 13000  | 8550    |
|  | К-13Д              | 22100             | 25000 | 23600   | 1760             | 4400   | 2590    |
|  | К-14               | 6                 | 14    | 10      | 19               | 130    | 78      |
|  | К-14Д              | 7                 | 19    | 13      | 15               | 83     | 37      |
|  | 169/Q1             | 5                 | 30    | 18      | 78               | 140    | 107     |
|  | 169/Q2             | 3                 | 13    | 8       | 46               | 160    | 119     |
|  | 169/Q3             | 34                | 52    | 43      | 94               | 170    | 121     |
| "Рудий ліс" — ПТЛРВ<br>(район Янівського затону) | К-4                | 5                 | 19    | 12      | 83               | 630    | 232     |
|  | К-5                | 18                | 52    | 35      | 2500             | 4700   | 3400    |
|  | К-6                | 17                | 55    | 36      | 12000            | 37000  | 23500   |
|  | К-7                | 20                | 30    | 25      | 19000            | 57000  | 35000   |
| ПЗРВ "Підлісний"                                 | 4**                | —                 | —     | —       | 670              | 670    | 670     |
|  | 5**                | —                 | —     | —       | 234              | 234    | 234     |
|  | 10                 | 5                 | 14    | 10      | 59               | 100    | 79      |
|  | 11                 | 4                 | 12    | 9       | 40               | 108    | 62      |
|  | 12                 | 12                | 57    | 33      | 84               | 160    | 133     |
|  | 15                 | 11                | 14    | 13      | 79               | 207    | 157     |
|  | НС-3               | 69                | 810   | 282     | 170              | 400    | 296     |
|  | НС-4               | 53                | 76    | 63      | 131              | 1600   | 523     |
|  | НС-5               | 17                | 49    | 32      | 82               | 220    | 143     |
|  | НС-6               | 29                | 96    | 48      | 60               | 110    | 81      |
|  | НС-7               | 26                | 127   | 65      | 56               | 180    | 89      |
| НС-8   | 105                | 182               | 151   | 46      | 101              | 80     |         |
| ПЗРВ "3-я черга ЧАЕС"                            | 2                  | 12                | 34    | 25      | 31               | 120    | 75      |
|  | 3                  | 67                | 120   | 87      | 93               | 570    | 230     |
|  | 4                  | 20                | 29    | 25      | 230              | 4800   | 1400    |
|  | 8                  | 5                 | 15    | 11      | 35               | 370    | 200     |
|  | 14                 | 69                | 120   | 94      | 270              | 450    | 370     |
|  | 15                 | 15                | 58    | 31      | 63               | 120    | 96      |
| ПЗРВ "Буряківка"                                 | 5                  | 11                | 16    | 14      | 59               | 150    | 110     |
|  | 14                 | 9                 | 26    | 17      | 45               | 160    | 88      |
|  | 22                 | 13                | 48    | 30      | 45               | 380    | 170     |
|  | 35                 | 8                 | 43    | 24      | 31               | 59     | 49      |
|  | 53                 | 9                 | 25    | 15      | 13               | 46     | 29      |

Закінчення таблиці 7

| Пункт пробовідбору   | № спостер. свердл. | <sup>137</sup> Cs |       |         | <sup>90</sup> Sr |       |         |
|--|--------------------|-------------------|-------|---------|------------------|-------|---------|
|  |                    | Мін.              | Макс. | Середня | Мін.             | Макс. | Середня |
| Дренажна завіса<br>водойми-охолоджувача,<br>ПК-32, 64, 113 | 64                 | 21                | 56    | 39      | 1000             | 1300  | 1190    |
|  | 92/1               | 5                 | 43    | 24      | 860              | 950   | 900     |
|  | 92/2               | 8                 | 10    | 9       | 2000             | 2600  | 2300    |
|  | 151/1K             | 9                 | 10    | 10      | 1200             | 1400  | 1280    |
|  | 151/3K             | 6                 | 9     | 8       | 270              | 1500  | 1070    |
| Район водойми-<br>охолоджувача, ПК-14                      | 26                 | 12                | 15    | 14      | 1300             | 2100  | 1580    |
|  | 2                  | 6                 | 13    | 9       | 1300             | 1800  | 1530    |
|  | 2а                 | 7                 | 9     | 8       | 4200             | 7900  | 6100    |
| Водоохоронні споруди<br>на Лівобережному<br>польдері*      | 201-1**            | 10                | 10    | 10      | 130              | 130   | 130     |
|  | 201/1**            | 34                | 34    | 34      | 190              | 190   | 190     |
|  | 203-1**            | 37                | 37    | 37      | 60               | 110   | 84      |
|  | 206-1**            | 3                 | 3     | 3       | 180              | 220   | 200     |
| Район озера Азбучин  | 2                  | 4                 | 38    | 14      | 9200             | 54000 | 31500   |
|  | 2А                 | 56                | 114   | 84      | 1600             | 66000 | 49400   |
|  | 3                  | 6                 | 45    | 18      | 3100             | 36900 | 11100   |
|  | 3А                 | 12                | 38    | 23      | 11500            | 44000 | 31900   |
| Піщане плато — ПТЛРВ<br>(р-н Семиходського<br>старика)     | К-1                | 6                 | 204   | 65      | 87               | 400   | 180     |

Примітки: \* — моніторинг не проводився через відсутність доступу; \*\* — за відсутності постійного доступу пробу відібрано одноразово.

концентрації <sup>137</sup>Cs у воді цих свердловин спостерігаються після затоплення у 2013 році території приповерхневих захоронень ПТЛРВ талими та дощовими водами.

За результатами моніторингу в 2025 році радіаційний стан ґрунтових вод у межах ПЗРВ характеризується коливаннями вмісту <sup>90</sup>Sr у воді свердловин на 1–2 порядки значень: ПЗРВ “Підлісний” — 40–

1600 Бк/м<sup>3</sup>; ПЗРВ “3-я черга ЧАЕС” — 31–4800 Бк/м<sup>3</sup>; ПЗРВ “Буряківка” — 13–380 Бк/м<sup>3</sup>.

Середньорічні значення глибин залягання рівня ґрунтових вод на контрольованих ПЗРВ та ПТЛРВ зони відчуження наведені в табл. 8. За даними спостережень на ПЗРВ “Підлісний”, “III черга ЧАЕС” та “Буряківка” зафіксоване зниження рівнів води від поверхні у переважній більшості свердловин.

Таблиця 8. Середньорічні значення глибин залягання рівня ґрунтових вод (від гирла свердловин) на контрольованих ПЗРВ та ПТЛРВ зони відчуження, м

| № свердл.               | 2020  | 2021  | 2022  | 2023  | 2024  | 2025  |       |         |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
|                         |       |       |       |       |       | Мін.  | Макс. | Середнє |
| <i>ПЗРВ “Буряківка”</i> |       |       |       |       |       |       |       |         |
| 5                       | 15,29 | 15,30 | 15,56 | 15,04 | 14,46 | 14,35 | 14,74 | 14,60   |
| 14                      | 16,29 | 16,59 | 16,63 | 16,09 | 15,56 | 15,43 | 15,80 | 15,63   |
| 22                      | 16,65 | 16,99 | 17,00 | 16,51 | 15,95 | 15,77 | 16,09 | 15,95   |
| 35                      | 17,84 | 18,18 | 18,24 | 17,76 | 17,22 | 17,04 | 17,29 | 17,18   |
| 44                      | 17,30 | 17,66 | 17,70 | 17,22 | 16,68 | 16,45 | 16,78 | 16,64   |
| 53                      | 17,67 | 17,67 | 18,03 | 17,56 | 17,01 | 16,93 | 17,15 | 17,03   |
| 55                      | 17,40 | 17,72 | 17,77 | 17,32 | 16,78 | 16,69 | 16,91 | 16,79   |
| 139                     | 16,81 | 16,85 | 16,85 | 16,38 | 15,77 | 15,66 | 16,04 | 15,88   |
| 147                     | 18,95 | 19,26 | 19,30 | 18,81 | 18,28 | 18,12 | 18,42 | 18,27   |

Закінчення таблиці 8

| № свердл.                      | 2020            | 2021  | 2022            | 2023            | 2024            | 2025            |                 |                 |
|--------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                |                 |       |                 |                 |                 | Мін.            | Макс.           | Середнє         |
| <i>ПЗРВ "Підлісний"</i>        |                 |       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| Н-2 <sup>1)</sup>              | 8,57            | 8,82  | — <sup>2)</sup> | 7,98            | 7,90            | 8,68            | 8,68            | 8,68            |
| Н-3 <sup>1)</sup>              | 8,95            | 8,29  | 8,10            | 7,55            | 7,42            | 8,12            | 8,29            | 8,20            |
| 4                              | 8,11            | 7,79  | 7,67            | 7,18            | 7,10            | 7,75            | 7,75            | 7,75            |
| 5                              | — <sup>3)</sup> | 7,16  | 7,25            | 6,88            | 6,81            | 7,36            | 7,36            | 7,36            |
| 10                             | 7,71            | 7,47  | 7,35            | 6,90            | 6,81            | 7,30            | 7,56            | 7,38            |
| 11                             | 7,71            | 7,46  | 7,29            | 6,83            | 6,74            | 7,26            | 7,47            | 7,34            |
| 12                             | 2,70            | 2,39  | 2,33            | 1,79            | 1,80            | 2,29            | 2,54            | 2,38            |
| 15                             | 7,61            | 7,38  | 7,24            | 6,76            | 6,69            | 7,20            | 7,44            | 7,28            |
| НС-3                           | 8,29            | 8,05  | 7,92            | 7,42            | 7,26            | 7,87            | 8,09            | 7,95            |
| НС-4                           | 8,27            | 8,02  | 7,87            | 7,36            | 7,29            | 7,84            | 8,05            | 7,93            |
| НС-5                           | 8,34            | 8,09  | 7,94            | 7,44            | 7,36            | 7,91            | 8,12            | 7,99            |
| НС-6                           | 7,78            | 7,52  | 7,25            | 6,79            | 6,36            | 7,22            | 7,40            | 7,35            |
| НС-7                           | 7,83            | 7,57  | 7,36            | 6,91            | 6,78            | 7,44            | 7,57            | 7,52            |
| НС-8                           | 8,06            | 7,79  | 7,56            | 7,09            | 6,94            | 7,60            | 7,74            | 7,68            |
| <i>ПЗРВ "ІІІ-я черга ЧАЕС"</i> |                 |       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 2                              | 8,75            | 8,70  | 8,54            | 8,11            | 7,91            | 8,17            | 8,35            | 8,29            |
| 3                              | 8,76            | 8,69  | 8,53            | 8,08            | 7,88            | 8,14            | 8,36            | 8,26            |
| 4                              | 8,56            | 8,47  | 8,32            | 7,83            | 7,57            | 7,87            | 8,14            | 8,03            |
| 6                              | 8,56            | 8,44  | 8,23            | 7,68            | 7,44            | 7,69            | 8,03            | 7,88            |
| 8                              | 8,10            | 7,93  | 7,75            | 7,15            | 6,85            | 7,10            | 7,46            | 7,30            |
| 13                             | 8,43            | 8,29  | 8,08            | 7,56            | 7,24            | 7,54            | 7,79            | 7,67            |
| 14                             | 8,22            | 8,29  | 7,97            | 7,74            | — <sup>4)</sup> | — <sup>4)</sup> | — <sup>4)</sup> | — <sup>4)</sup> |
| 15                             | 7,69            | 7,60  | 7,46            | 6,97            | 7,03            | 7,05            | 7,24            | 7,15            |
| <i>ПТЛРВ "Пицане плато"</i>    |                 |       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| К-1                            | 3,71            | 3,51  | 3,45            | 2,52            | 2,59            | 3,31            | 3,52            | 3,42            |
| К-3                            | 4,23            | 3,55  | 3,88            | 2,62            | 1,86            | — <sup>4)</sup> | — <sup>4)</sup> | — <sup>4)</sup> |
| <i>ПТЛРВ "Чистоголівка"</i>    |                 |       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 8                              | 18,10           | 18,41 | 18,57           | — <sup>4)</sup> | — <sup>4)</sup> | — <sup>4)</sup> | — <sup>4)</sup> | — <sup>4)</sup> |
| <i>ПТЛРВ "Стара Будбаза"</i>   |                 |       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 1/2                            | 6,90            | 6,53  | 6,38            | 5,51            | 5,62            | 6,05            | 6,53            | 5,36            |
| 2/2                            | 4,11            | 3,81  | 3,71            | 3,07            | 2,91            | 3,44            | 3,74            | 3,57            |
| <i>ПТЛРВ "Нафтобаза"</i>       |                 |       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| К-4                            | 9,56            | 9,23  | 9,17            | 8,45            | 8,39            | 8,98            | 9,32            | 9,14            |
| К-5                            | 6,87            | 6,56  | 6,44            | 5,78            | 5,72            | 6,33            | 6,73            | 6,49            |
| К-6                            | 2,84            | 2,51  | 2,46            | 1,73            | 1,70            | 2,37            | 2,65            | 2,48            |
| К-7                            | 3,49            | 3,07  | 3,05            | 2,25            | 2,25            | 3,01            | 3,31            | 3,12            |
| <i>ПТЛРВ "Станція Янів"</i>    |                 |       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| К-14                           | 4,64            | 4,40  | 4,32            | 3,55            | 3,44            | 3,85            | 4,18            | 4,09            |
| К-15                           | 5,34            | 5,07  | 5,10            | 4,13            | 4,12            | 4,44            | 4,87            | 4,69            |
| <i>ПТЛРВ "Нова Будбаза"</i>    |                 |       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 3/1                            | 2,36            | 1,57  | 1,78            | 0,64            | 0,61            | 0,39            | 0,94            | 0,67            |
| <i>ПТЛРВ "Рудий ліс"</i>       |                 |       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 1/1                            | 3,24            | 2,88  | 2,68            | 2,03            | 1,83            | 2,22            | 2,67            | 2,49            |
| 2/1                            | 4,01            | 3,55  | 3,48            | 2,79            | 2,63            | 2,93            | 3,40            | 3,19            |

Примітки: 1. Свердловини Н-2 і Н-3 введені в регламент з ІІІ кварталу 2019 року. 2. Вода у свердловинах була відсутня. 3. Дані наведені за І і ІІ квартали. В ІІІ і ІV кварталах вода у свердловинах була відсутня. 4. Відбір проб для визначення вмісту радіонуклідів не проводився у зв'язку з відсутністю доступу.

Середні значення рівня, у порівнянні з минулим роком, впали на 0,55–0,99, 0,12–0,46 та 0,01–0,14 метрів відповідно.

### РАДІАЦІЙНИЙ СТАН ЛАНДШАФТІВ

У 2025 році у зв'язку з повномасштабним вторгненням рф моніторинг було поновлено на 7 з 15 ландшафтних полігонів. Сумарна щільність забруднення радіонуклідами ґрунтового покриву у шарі 0–20 см склала: для  $^{137}\text{Cs}$  у межах 77 — 8500 кБк/м<sup>2</sup>, для  $^{90}\text{Sr}$  — від 8,5 до 3000 кБк/м<sup>2</sup>. Дані по ландшафтних полігонах на різних рівнях рельєфу наведені в табл. 9.

Таблиця 9. **Щільність забруднення ґрунту радіонуклідами  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  ґрунтового покриву на ЛП, кБк/м<sup>2</sup>**

| № ЛП   | Шар відбору проб, см | Радіонукліди      |                  |
|--|----------------------|-------------------|------------------|
|  |                      | $^{137}\text{Cs}$ | $^{90}\text{Sr}$ |
| <i>Ландшафтні полігони вододільних рівнин (ЛП 1-4, 11-12)</i>                  |                      |                   |                  |
| 2  | 0–20                 | 560               | 82               |
| 4  |                      | 1600              | 300              |
| 11   |                      | 77                | 8,5              |
| <i>Ландшафтні полігони надзаплавної тераси р. Прип'ять (ЛП 5, 7-8, 10, 13)</i> |                      |                   |                  |
| 8  | 0–20                 | 3500              | 1400             |
| <i>Ландшафтні полігони заплави р. Прип'ять (ЛП 6, 9)</i>                       |                      |                   |                  |
| 9  | 0–20                 | 8500              | 3000             |
| <i>Молоді насадження сосни (біля с. Копачі)</i>                                |                      |                   |                  |
| 14   | 0–20                 | 900               | 58               |
| <i>Згаріще (місце пожежі в 2015 році)</i>                                      |                      |                   |                  |
| 15   | 0–20                 | 150               | 12               |

Дослідження вертикального розподілу радіонуклідів (глибина 0–50 см) показало, що основний запас  $^{137}\text{Cs}$  (83%) знаходиться в шарі 0–15 см, для  $^{90}\text{Sr}$  84% запасів зосереджено в 0–30 см шарі ґрунту.

У межах одного полігону вміст радіонуклідів у пробах трави, взятої із двох різних точок, може відрізнятися на порядки, у пробах фракцій деревостану — на один порядок. Це пов'язано з тим, що надходження радіонуклідів до рослин відбувається переважно через кореневу систему, тобто його обсяги залежать від характеру радіоактивного забруднення ґрунту. Найменша різниця питомої активності, в межах одного полігону, спостерігається для деревини, тому що завдяки значній площі

розміщення кореневої системи дерев, нівелюється плямистість забруднення ґрунту.

Компоненти деревостану (листя, хвоя, кора, деревина) на відміну від ґрунту мають більшу концентрацію  $^{90}\text{Sr}$ , ніж  $^{137}\text{Cs}$ . Максимальна активність як  $^{137}\text{Cs}$  так і  $^{90}\text{Sr}$  спостерігається у внутрішній корі. Серед інших компонентів біоценозу (трава, мох, лісова підстилка) максимальна активність  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  спостерігаються в лісовій підстилці та траві.

У компонентах біоценозу ЛП питома активність радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  знаходиться у таких межах:

- деревина сосни:  $^{137}\text{Cs}$  від 0,02 до 3,4 кБк/кг,  $^{90}\text{Sr}$  від 0,20 до 27 кБк/кг;
- деревина листяних порід:  $^{137}\text{Cs}$  від 0,02 до 24 кБк/кг,  $^{90}\text{Sr}$  від 0,11 до 77 кБк/кг;
- наземний рослинний покрив:  $^{137}\text{Cs}$  від 0,02 до 67 кБк/кг,  $^{90}\text{Sr}$  від 0,05 до 78 кБк/кг;
- лісова підстилка:  $^{137}\text{Cs}$  від 0,63 до 100 кБк/кг,  $^{90}\text{Sr}$  від 0,94 до 200 кБк/кг.

Вміст трансуранових елементів у рослинності порівняно з забрудненням  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  незначний — від 0,00017 до 0,32 кБк/кг. Розподіл цих радіонуклідів за фракціями фітомаси та компонентами рослинності не має вираженої диференціації, на відміну від інших радіонуклідів. Так, не спостерігаються значні відміни в концентрації між зовнішньою, внутрішньою корою та деревиною. У живій фітомасі найбільший рівень забруднення має глиця першого року.

Максимальний рівень забруднення ТУЕ спостерігається у підстилці. Питома активність ТУЕ ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) у рослинності на два-три порядки менша, ніж  $^{137}\text{Cs}$  або  $^{90}\text{Sr}$ .

Важливим показником міграційної здатності є коефіцієнт переходу (КП) радіонуклідів у рослинність. Найвищі значення КП  $^{137}\text{Cs}$  характерні для ландшафтних полігонів надзаплавної тераси. КП  $^{90}\text{Sr}$  у порівнянні із  $^{137}\text{Cs}$  значно вищі — особливо добре це прослідковується на ландшафтних полігонах вододільних рівнин та заплави. Таке явище спостерігається на ландшафтах, де в ґрунтах відмічається значний дефіцит лужноземельних металів, особливо кальцію.

### ВИСНОВКИ

1. У 2025 році максимальні значення потужності еквівалента амбієнтної дози гамма-випромінювання зафіксовані на території північного та західного "слідів" радіоактивних випадів 1986 року.

2. У місцях найбільш тривалого перебування персоналу ЗВ об'ємна активність  $^{137}\text{Cs}$  у приземному шарі атмосфери становила: м. Чорнобиль — від  $1,0\text{E}-06$  до  $8,1\text{E}-05$  Бк/м<sup>3</sup> з одним незначним пе-

ревищенням контрольного рівня у квітні, на КДП Дитятки — від  $6,4E-07$  до  $8,8E-05$  Бк/м<sup>3</sup> без перевищення контрольних рівнів забруднення повітря. У порівнянні з 2024 роком, середньорічне значення об'ємної активності <sup>137</sup>Cs та <sup>90</sup>Sr у приземному шарі атмосфери ЗВ залишилося приблизно на тому ж рівні або незначно знизилася.

3. Поверхневі води залишаються домінуючим шляхом винесення радіонуклідів за межі ЗВ. У 2025 році винесення <sup>90</sup>Sr р. Прип'ять у створі м. Чорнобиль було в 3,2 раза меншим за таке у 2024 р. та в 2,5 раза меншим порівняно із середнім значенням за останні 5 років.

4. Найзабрудненішою відкритою водоймою залишається оз. Азбучин, вода якого за вмістом <sup>90</sup>Sr відповідає категорії радіоактивних відходів.

5. Середнє значення забруднення радіонуклідами еоценового і сеноман-нижньокрейдодового водонесних комплексів не перевищує 2 Бк/м<sup>3</sup> за <sup>137</sup>Cs та 5,9 Бк/м<sup>3</sup> за <sup>90</sup>Sr.

Забруднення води <sup>90</sup>Sr характерне для всіх свердловин. Високі показники забруднення води

<sup>137</sup>Cs (25 000 Бк/м<sup>3</sup>) відмічались у свердловині К-13Д в районі с. Лісового.

Істотними локальними джерелами радіоактивного забруднення підземних вод четвертинного водонесного комплексу є ПТЛРВ. Основні запаси активності зосереджено в ПТЛРВ "Будбаза" та "Рудий ліс", які розташовані вздовж західного сліду чорнобильського викиду. За прямого впливу р. Прип'ять на баланс ґрунтових вод на 700–800-метрову ширину смуги заплави, розподілені на ландшафті запаси радіонуклідів (епюри розподілу яких по розрізу ґрунту мають потужність до 0,5 м) практично протягом всього року знаходяться на підтопленій території або безпосередньо у воді. Порооди зони аерації втратили захисну функцію і перетворились на зону прямого транзиту радіонуклідів до рівня ґрунтових вод.

6. Результати моніторингу на ландшафтних полігонах свідчать, що радіоактивне забруднення компонентів довкілля варіює в широких межах та залежить від характеру первинних радіоактивних випадів чорнобильського походження.

## ЛІТЕРАТУРА

- Кіреєв С.І., Нікітіна Т.І., Самойлов Д.А., Бунтова О.Г., Федоренко О.А., Пилипчук Т.В., Лясківський В.В. (2025). Радіаційний стан зони відчуження в 2024 році за результатами радіаційно-екологічного моніторингу. *Метеорологія, гідрологія, моніторинг довкілля*, 1(7), 79–97.
- Одум Ю. (1975). Основы экологии. Под ред. д-ра биол. наук Н.П. Наумова. Москва: Мир, 1245 с.
- Основні контрольні рівні, рівні звільнення та рівні дії щодо радіоактивного забруднення об'єктів зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення. (2013). Гігієнічні нормативи затверджені ДАЗВ. ВД-95.
- Прогнозирование геомиграции радионуклидов из ПЗРО "Подлесный" и "3-я очередь ЧАЭС". (2008). Заключение отчета НИР, Том 1. Прогнозирование геомиграции радионуклидов из ПЗРО "Подлесный", Киев, ЧП "Гео-Эко-Консалтинг". Расчет объемной активности радионуклидов в р. Припять при выносе радионуклидов из ПЗРО "Подлесное". (2008). Желтые Воды, НТЦ КОРО.
- Регламент работ ДСП "Екоцентр" з радіаційно-екологічного моніторингу та радіаційно-дозиметричного контролю на території зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення. (2017). Чорнобиль, ДСП Екоцентр, 69 с.
- Шевченко О.Л., Долін В.В., Орлов О.О., Шабалін Б.Г., Кіреєв С., Азімов О.Т. та ін. (2023). Радіогідрогеохімія водозбірних басейнів Чорнобильської зони відчуження. За ред. Шевченка О.Л., Доліна В.В. Київ: Наукова думка, 348 с. <http://doi.org/10.15407/978-966-00-1855-6>
- Nazarov Alexander, Gudkov Dmitri, Kirieiev Sergey, Kaglyan Alexander, Obrizan Sergey. The dynamics of the natural purification processes in aquatic ecosystems within the Chernobyl Exclusion Zone (in press).
- Basic control levels, exemption levels and action levels for radioactive contamination of objects in the exclusion zone and the zone of unconditional (mandatory) resettlement. (2013). Hygienic standards approved by the State Agency for the Protection of the Environment. VD-95.
- Calculation of volume activity of radionuclides in Pripjat River during the removal of radionuclides from the "Podlesnoe" PZRO. (2008). Jovti Vody, STC KOR0.
- Forecasting the geomigration of radionuclides from the "Podlesny" PZRO and the "3<sup>rd</sup> stage of the Chernobyl nuclear power plant". (2008). The final report on the scientific research work. Vol. 1. Prediction of geomigration of radionuclides from PZRO "Podlesny", Kyiv, PE "Geo-Eco-Consulting".
- Kirieiev S.I., Nikitina T.I., Samoiloov D.A., Buntova O.G., Fedorenko O.A., Pylypchuk T.V., Liaskivskiy V.V. (2025). Radiation status of the exclusion zone in 2024 according to the results of radiation and environmental monitoring. *Meteorology, hydrology, environmental monitoring*, 1(7), 79–97.
- Nazarov Alexander, Gudkov Dmitri, Kirieiev Sergey, Kaglyan Alexander, Obrizan Sergey. The dynamics of the natural purification processes in aquatic ecosystems within the Chernobyl Exclusion Zone (in press).
- Odum, Y. (1975). Fundamentals of ecology. Ed. Doctor of Biological Sciences N.P. Naumov. Moscow.
- Regulations of the work of the State Enterprise "Ecocenter" on radiation and ecological monitoring and radiation and dosimetric control in the territory of the exclusion zone and the zone of unconditional (mandatory) resettlement. (2017). Chernobyl, State Enterprise "Ecocenter", 69 p.
- Shevchenko O.L., Dolin V.V., Orlov O.O., Shabalin B.G., Kirieiev S., Azimov O.T. et al. (2023). Radiohydro-geochemistry of catchment areas of the Chernobyl Exclusion Zone. Edited by Shevchenko O.L., Dolin V.V. Kyiv: Naukova Dumka, 348 p.

## RADIATION STATE OF THE EXCLUSION ZONE OF 2025 IN ACCORDANCE WITH THE RESULTS OF RADIATION ENVIRONMENTAL MONITORING

**Serhii Kirieiev**

ORCID: 0000-0001-7059-3655

kireev@ecocentre.kiev.u

**Tetiana Nikitina**

ORCID: 0009-0003-6940-0686

**Dmytro Samoilov**

ORCID: 0009-0000-0465-4077

**Olena Buntova;**

ORCID: 0009-0001-2060-3613

**Oleksandr Fedorenko**

ORCID: 0009-0006-1387-709X

**Tetiana Pylypchuk**

ORCID: 0009-0008-6908-0420

**Vatslav Liaskivskyi**

ORCID:0009-0000-7908-5809

**Vitalii Horovenko**

State Specialized Enterprise "Ecocentre"

The article presents results of radiation and environmental monitoring in the Exclusion Zone for the year 2025. According to the results of radiation and environmental monitoring in the Exclusion Zone in 2025, important analytical data were obtained:

- Maximum power values of the ambient dose equivalent of gamma radiation are characteristic of the territories in the northern and western "traces" of radioactive fallout;
- Radiation state of the Exclusion Zone air environment and its dynamics during 2025 were determined by the nature of surface contamination of the territory, control levels exceeding activity in the air was recorded;
- Surface waters remain an important route of radionuclide removal beyond the Exclusion Zone;
- Radiation state of underground waters, radionuclide contamination of eocene and cenomanian-lower cretaceous water-bearing complexes;
- Monitoring results at landscape landfills;
- Radiation survey results of unauthorized residence places of the population in the Exclusion Zone.

Compared to 2024, the average annual value of the volumetric activity of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in the surface layer of the atmosphere of the Chernobyl Nuclear Power Plant remained approximately at the same level or slightly decreased. In 2025, the discharge of  $^{90}\text{Sr}$  from the Pripjat River in the Chernobyl zone was 3.2 times less than in 2024 and 2.5 times less than the average value of the last 5 years. The inflow of  $^{90}\text{Sr}$  from outside the exclusion zone did not exceed 32% of the total discharge from the Pripjat River. The content of  $^{90}\text{Sr}$  was recorded in all observation wells. The maximum values of the volumetric activity of  $^{90}\text{Sr}$  in the waters of the Quaternary aquifer complex were recorded in the areas of the old Budbaza, Lake Azbuchyn, and Yanivskyi Zaton, and were 140, 66, and 57 Bq/dm<sup>3</sup>.

**Keywords:** radiation and environmental monitoring, radiation state of environmental components, exclusion zone.



**О.Т. Азімов**

ORCID 0000-0002-5210-3920  
azimov@casre.kiev.ua

**С.І. Голубов**

ORCID 0000-0003-3711-598X  
asdfieldspec3@gmail.com

**М.С. Лубський**

ORCID 0000-0002-3545-0007  
nickolo1990@gmail.com

**Т.А. Орленко**

ORCID 0000-0002-4933-7750  
tetianaorlenko96@gmail.com

Державна установа  
"Науковий центр аерокосмічних  
досліджень Землі  
Інституту геологічних наук  
Національної академії наук  
України", Київ

УДК (910.3/4:546.95):504.064.3](916)

DOI:

# РЕЗУЛЬТАТИ ПОЛЬОВИХ ОБСТЕЖЕНЬ ДІЛЯНОК ДЛЯ ВАЛІДАЦІЇ МОНІТОРИНГОВОЇ ОЦІНКИ ДЕГРАДАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ КОРОЛІВСТВА МАРОККО ЗА РІЗНОРІДНИМИ ДАНИМИ.

## Стаття 1. РІВНИННА ПОСУШЛИВА ТЕРИТОРІЯ

Проведено польові дослідження стану компонентів ландшафту території в межах 22 площадок спостережень, спланованих на пройденому маршруті (профілі) вздовж річки Оуед Тенсіфт північніше м. Марракеш (Королівство Марокко). Особливості їх поточного стану (розвитку, пригніченості, спотворення, забруднення токсикантами, зміни одних на інші, повної або часткової відсутності певних компонентів тощо) охарактеризовано, сфотографовано, зафільмовано та описово задокументовано. Відповідний фактичний матеріал уведено в базу даних, створену в рамках географічної інформаційної системи. Унаслідок комплексного якісного аналізу особливостей стану компонентів ландшафту їх переведено в єдиний кількісний параметр класу деградації земель місцевості від 1-го (найдеградованіші) до 5-го (практично недеградовані). На вивченій території 1-й клас деградації оцінено на одній площадці обстеження, на восьми площадках — як 2-й, на сімох площадках — як 3-й, на шести площадках — як 4-й. Площадок із 5-м ступенем деградації земель у межах території досліджень не зафіксовано.

**Ключові слова:** Марокко, деградація земель, моніторинг довкілля, площадки спостереження, польові дослідження.

## ВСТУП ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Стратегічним напрямом розвитку кожної держави є організація інфраструктури сучасного суспільного функціонування, яка повинна бути адаптована до проблем безпеки людини і суспільства. Ці проблеми в кожній країні повинні вирішуватися у рамках єдиної державної стратегії сталого безпечного розвитку. Разом із тим для сучасного етапу розвитку світового суспільства притаманне зростання числа і частоти виникнення різномасштабних надзвичайних ситуацій (НС) техногенного та природного характеру (ТПХ), прискорення пов'язаних з ними катастрофічних процесів. Загалом це зумовлено розширенням масштабів і ускладненням техносфери та її впливом на природу і природні процеси, зумовлено глобальними змінами клімату на планеті, що в сукупності призводить до проявлення і поглиблення синергетизму зародження і розвитку НС ТПХ. Це означає що розвиваючись, одна НС спричиняє цілу низку інших, які разом впливають на соціально-екологічні, а відтак і на геоєколого-соціально-економічні умови проживання населення на відповідних територіях. Як правило, землі таких територій зазнають деградації різного ступеня, в їх межах часто відбуваються невпинні перетворення

в екосистемах, здебільшого безповоротні (Азімов та ін., 2006).

Таким чином, метою державної політики кожної країни у сфері захисту населення і територій від НС та пов'язаної з ними деградації земель на найближчі десятиріччя буде забезпечення гарантованого захисту життя, здоров'я людей, земельного, водного, повітряного простору відповідних регіонів, об'єктів виробничого і соціального призначення у допустимих межах показників ризику, критерії яких встановлюються для конкретного періоду розвитку з урахуванням вітчизняного і світового досвіду в цій галузі. Одним із актуальних, на наш погляд, ключових напрямів у державній політиці кожної країни щодо цього є вирішення загальної проблеми — розвиток та удосконалення систем моніторингу, спостереження і лабораторного контролю за станом компонентів довкілля.

Однією із складових моніторингового комплексу має стати система раннього попередження й оцінювання ризиків деградації земель на основі даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з урахуванням природних (зокрема, кліматичних) та антропогенних факторів, синергетична дія яких призводить до негативного ефекту стосовно стану екосистем.

Отже, розроблення і дослідно-методичне впровадження прототипу такої системи, що інтегруватиме комплекс даних різної фізичної природи (von Keyserlingk et al., 2023), отриманих різними методами (своєрідного гіперкубу даних; Giuliani et al., 2020), зокрема наземними спостереженнями (Thiam, 2003; Kirui et al., 2021), є актуальним, визначає *невирішену раніше частину загальної проблеми*. Нижче стисло узагальнимо основні наукові публікації, що характеризують певні результати в її вирішенні.

### ОГЛЯД ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

У науковій літературі розглядаються різні аспекти деградації земель і різні фактори, що призводять до подібних процесів (Tuñcau, Vaşkan, 2022). Не беручи до уваги критичні чинники, спричинені соціально-економічним станом територій і населення, що на них мешкає, фактори, викликані різноманітними внутрішньодержавними і міждержавними конфліктами тощо, зупинимось на стислому огляді публікацій, у яких аналізуються індикатори деградації, зумовлені станом компонентів ландшафту. Звісно на останні істотно впливають пов'язані з глобальними кліматичними змінами трансформації гідрометеорологічних показників, що відображаються на стані складових довокілья (Karmaoui, Messouli, 2014): поверхневих і підземних (передовсім ґрунтових) вод, на ступені зволоження ґрунтів і приповерхневих відкладів осадового чохла, на інтенсивності впливу на них різноманітних екзогенних процесів, на умовах місцезростання і кондиціях рослинного покриву, його біологічній продуктивності, на умовах життєдіяльності представників тваринного світу тощо. І часто зазначені зміни і впливи крім суто природних чинників зумовлені й одночасними з ними діями численних антропогенних факторів. Таким чином, будь-яка територія повинна сприйматися і в ряді робіт (Azimov et al., 2021; Khrushchov et al., 2021; Азімов та ін., 2023b) розглядається як природно-техно(антропо)генна система.

Аналізуючи останні дослідження і наукові публікації у сфері деградації земель загалом і поширених в їхніх межах компонентів ландшафту зокрема, у роботі акцентовану увагу звернемо лише на ті, що базувалися на застосуванні сучасних інформаційних технологій на основі дистанційних методів і географічних інформаційних систем (ГІС). Так, результати досліджень процесів деградації земель, пов'язаних з ерозією поверхневих відкладів та іншими екзогенними геологічними процесами, а також зі змінами фізико-хімічних характеристик ґрунтів висвітлені у низці статей (Haboudane et al., 2002; Ibrahim et al., 2015; Lamqadem et al., 2018; та ін.), зокрема й по

території Марокко (Haidara et al., 2017; Farah et al., 2021; Orlenko et al., 2025; та ін.). На підставі порівняльного оцінювання значень спектрометричних характеристик різних типів рослинності та обчислених за ними індексів (зокрема, вегетаційних; Lyon et al., 1998) визначаються зміни в рослинному покриві, деградація значних площ лісів тощо. У цьому контексті зазначимо, що відповідні проекти охоплювали й певні провінції Марокко (Zkhirri et al., 2018; Hammouyat et al., 2022; та ін.).

Є ряд робіт щодо деградаційних процесів, індукованих впливом людської діяльності на певній території, наприклад, у межах Південної Африки (Wessels et al., 2004).

Багато публікацій, в яких йдеться про застосування геоінформаційних технологій, присвячено вивченню як деградації земель загалом (de Jong et al., 2011; Hussain et al., 2013; Kirui et al., 2021; Symeonakis, 2022; Abdel Rahman, 2023; Nandi et al., 2025; та ін.), так і на конкретній території зокрема (Amisshah-Arthur et al., 2000; Sujatha et al., 2000; Petit et al., 2001; Thiam, 2003; Giuliani et al., 2020; Halbacsotoara-Zamfir et al., 2020; Reith et al., 2021; та ін.). Приналежні до цієї проблематики й статті, що стосуються території Марокко (Karmaoui, Messouli, 2014; Bouazzaoui et al., 2016; та ін.).

Як слідує із наведеного огляду, зазначені проблеми щодо деградації земель (наприклад, пов'язані з процесами опустелювання) характерні для багатьох країн порубіжжя Європейського Союзу, зокрема й для території розташованого на Африканському континенті північно-західніше пустелі Сахара **Королівства Марокко — регіону наших досліджень**. У межах останнього відібрано кілька *тестових полігонів* для апробації можливостей системи з оцінювання та картографічної візуалізації стану земель й прогнозування потенційного їх деградування. На території полігонів нами проведені польові роботи.

### МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Метою польової роботи є дослідження ступеню (або класу) деградації земель у межах площадок спостережень на підставі аналітичного візуального оцінювання стану основних, притаманних для території компонентів ландшафту та їхніх елементів безпосередньо на місцевості (*in situ*). Таким чином, комплекс основних компонентів ландшафту території є **об'єктом досліджень**.

Таким чином, польові дослідження включали комплекс візуального аналізу різноманітних особливостей території, що було *першим із основних завдань польових робіт*. Аналізувалися такі особливості території з відповідною їх фіксацією у по-

льовий щоденник і фотографуванням: геоморфологічні, гідрологічні, ґрунтово-літологічні, ботанічні, зоологічні (за наявності відповідних об'єктів спостереження). Проводився також аналіз ландшафтних умов місцевості по ходу маршруту між площадками спостережень. Отже, дослідження стосувалися загалом ландшафтних особливостей території.

На підставі аналітичного поєднання отриманої інформації вирішувалося *друге з основних завдань польових досліджень* — попереднє визначення ступеня деградації місцевості в межах кожної окремо взятої площадки спостереження із встановленням відповідного класу (або ступеня) за п'ятибальною шкалою.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Вихідними **матеріалами для досліджень** на етапі планування польових робіт (вибір репрезентативних площадок спостережень) в основному слугували дані ДЗЗ, результати їх комп'ютеризованого оброблення з використанням спеціалізованих програм та результати їх проблемно орієнтованої інтерпретації. Найперше застосовувалися матеріали різноманітних багатоспектральних *космічних знімків* із відкритих джерел (Google Earth, Google Map та USGS — The United States Geological Survey, Геологічна служба Сполучених Штатів), починаючи з отриманих з Інтернет-джерел оглядових зображень, що дозволяють розпізнавати компоненти ландшафту території загалом, та закінчуючи супутниковими даними високого просторового розрізнення, на яких конкретні елементи цих компонентів добре ідентифікуються.

Комплекс *комп'ютеризованих методів перетворень отриманих із космічних апаратів* даних полягав у фільтрації, контрастуванні, синтезуванні багатоспектральних зображень. Тематична їх інтерпретація насамперед базувалася на аналітичному візуальному виділенні та порівнянні різних типів земних покривів, відмінних на даних ДЗЗ за своїми структурно-текстурними і спектральними особливостями, оцінюванні їхніх геометричних параметрів. На цій підставі виконувався якісний аналіз ландшафтно-інформативності космічних знімків, оцінювання на їх основі ландшафтно-структури території: загальної за генералізованими зображеннями та диференційованішої за матеріалами детальних знімків. З-поміж *програмних продуктів* за основу були взяті сучасні високоефективні пакети ERDAS Imagine, ENVI та ГІС ArcGIS і QGIS.

Місцеположення площадок спостережень орієнтовно намічалось таким чином, щоб вони відносно рівномірно розташовувалися вздовж кожного з маршрутних профілів із дотриманням відстані між

площадками не менше ніж у 500 м, а по можливості й ще меншій. Геометричні розміри площадок повинні були задовольняти вимоги розпізнавання їх на космічних зображеннях принаймні середнього просторового розрізнення — для використання їх як тестових, так і завіркових у процесі визначення особливостей деградації земель території кожного з полігонів досліджень за комплексом різноманітних даних про його ландшафт із урахуванням дистанційно встановлених параметрів відповідних компонентів. Тобто здебільшого розміри площадок спостережень були не менше як  $\sim 200 \times 300$  м.

Іншим вагомим критерієм попереднього планування на місцевості площадок спостережень була вимога представницького висвітлення ними по максимуму всіх класів (або ступенів) деградації земель на території досліджень. Відповідно до прийнятої в роботі шкали відносно найбільш деградованим землям надавався клас 1-й, натомість площам із відносно добрими показниками, тобто найменш деградованим або ж майже недеградованим — клас 5-й. Таким чином, якісно визначені показники стану кожного з компонентів ландшафту у процесі аналітичного порівняння комплексувалися і переводилися в єдиний кількісний параметр деградації земель у районі конкретної площадки спостережень.

Таким чином, площі з імовірно різними класами деградації на передпольовому етапі робіт встановлювалися саме з використанням даних ДЗЗ. І, як ми бачимо, вимоги до площадок спостережень та процедура їх вибору для визначення класу деградації земель фактично аналогічні тим, що й під час геологічних досліджень із залученням даних ДЗЗ (Азімов, 2012, 2024).

Власне у процесі польових досліджень площадок спостережень клас деградації земель в їх межах визначався безпосередньо на місцевості. Особливості стану компонентів ландшафту на конкретній площадці аналітично порівнювалися із такими ж на інших площадках, у зв'язку з чим вагоме значення мав освітній рівень і набутий досвід дослідника. Здійснювалися відповідний детальний опис у польовому щоденнику і фотографування та відеозйомка характерних рис як власне кожної з площадок, так і ближніх територій довкола них. Загалом по регіону досліджень авторами у трьох маршрутах протягом першого експедиційного відрядження зроблено понад 450 фотографічних та відеозображень, основні з яких продемонстровані у статті.

Під час роботи дані ДЗЗ і попередньо підібрані топографічні карти місцевості були трансформовані у картографічну проєкцію та геодезичну систему координат UTM/WGS 84, яку в дослідженнях прийнято як базову. До цієї ж системи здійснювалася

географічна прив'язка й площадок наземних спостережень, координати яких у польових умовах визначалися з допомогою можливостей глобальної системи позиціонування (Global Positioning System — GPS). Таким чином, описові характеристики компонентів ландшафту в межах досліджених площадок та найвиразніші щодо їх відображення наземні фото- та відеознімки уводилися у створену в рамках ГС базу даних.

Протягом досліджень використано **методи**: метод системного підходу (об'єкт вивчення розглядається як загалом цілісна система, з якої виокремлюються й аналізуються складові її компоненти/елементи та їхні природні системні властивості); комп'ютеризовані методи перетворення багатоспектральних матеріалів ДЗЗ та методи їх ландшафтної різномасштабної інтерпретації; метод візуального оцінювання стану компонентів ландшафту безпосередньо на місцевості; метод аналітичного порівняння; метод картографічного оброблення й узгодження наземних і дистанційних даних із застосуванням ГС; тощо.

Нижче детальніше зупинимося на описовій характеристиці місцевості насамперед першого з відпрацьованих у регіоні досліджень тестового полігону, в межах якого пройдено маршрут (або профіль) I.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛІГОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ

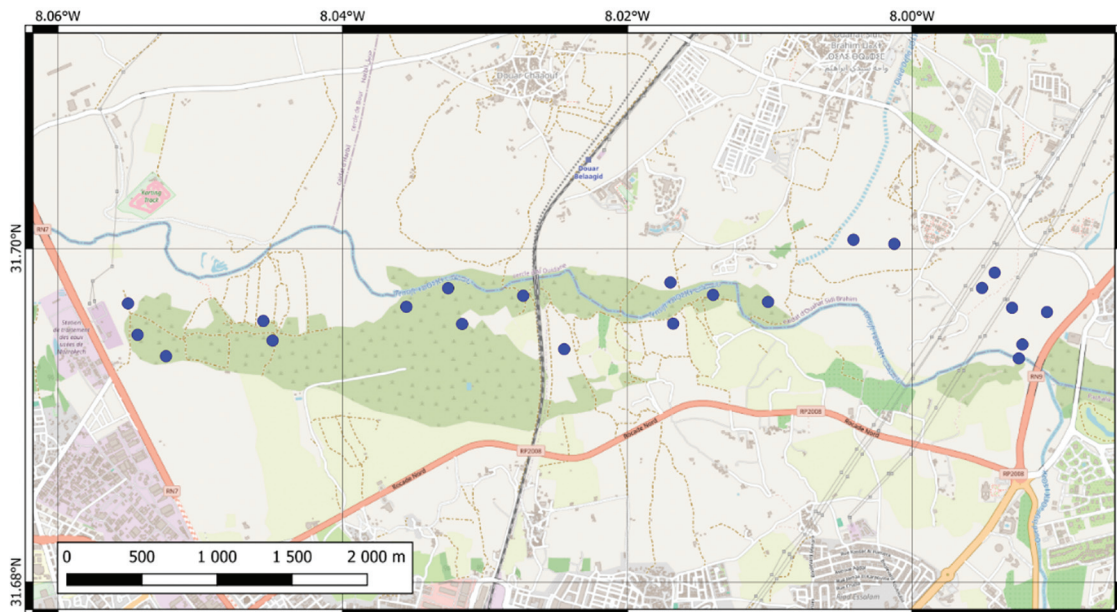
Територія полігону, в межах якої пролягав дослідний пішохідний маршрут (профіль) I, розташована приблизно у 2 км на північ від північної окраїни

м. Марракеш (рис. 1). Стосовно тектонічного районування вона розташована в межах мезозойсько-кайнозойського (Mz-Kz) плато. Власне за походженням геоморфологічно територія являє собою акумулятивну передгірську похилу **рівнину**, утворену вочевидь внаслідок накопичення у передгірській частині Високого Атласу делювіального матеріалу.

Морфологічно територія є горизонтальною (пласкою) рівниною, з одноманітним і незначним загальним похилом земної поверхні в бік Атлантичного океану, є рівниною горбистою, зважаючи на поширені в її межах відповідні окремі форми рельєфу. За типом (ступенем, глибиною розчленування рельєфу) ця рівнина фактично є нерозчленованою, оскільки характеризується незначними перепадами відносних висот (меншими за 10 м).

Географічно територія розташована приблизно на позначці 31,70° північної широти і на загал є **посушливою**, зважаючи на характерні для подібних районів зокрема та й регіону Марокко у цілому гідрометеорологічні умови (NASA...): незначну кількість атмосферних опадів, натомість переважання протягом більшості днів у році сонячної погоди з інтенсивною інсоляцією та випаровуванням вологи. В її межах наявна лише одна невелика за своїми масштабами й неповноводна протягом більшості сезонів у році річка Оуед Тенсіфт, що в сучасних умовах має відносно вузьку долину (див. рис. 1).

На поверхні території поширені переважно суглинки крейдового віку (К) мезозою, незадерновані й зневолені. Рослинність зростає місцями,



**Рис. 1.** Схема полігону дослідження і розташування площадок спостережень вздовж маршруту I на топографічній карті місцевості масштабу 1:200 000

окремими угрупованнями, тому на великих площах суглинки є відслоненими.

Отже, маршрут I проходив уздовж долини р. Оуед Тенсіфт загального субширотного (майже до узбережжя Атлантичного океану) простягання. Течія річки спрямована на захід.

### ОПИС МАРШРУТУ

Пішохідний **маршрут (профіль) I** відпрацьовано 15 жовтня 2025 р. Розпочався він о 8:00 год. за місцевим часом за температури повітря в тіні близько +25°C, північніше долини р. Оуед Тенсіфт, і спрямовувався зі сходу на захід з метою убезпечення обличчя дослідників від прямих, енергетично досить активних сонячних променів. На маршруті охарактеризовано особливості ландшафту на 22-х площадках спостережень (див. *рис. 1*), а також описано певні аномальні умови місцевості між деякими з них, здійснено відповідне фотографування з отриманням понад 150-и авторських фото- та відеозображень.

Так, якщо врахувати ландшафтно-геоморфологічні умови території, насамперед гіпсометрію рельєфу сучасної земної поверхні (абсолютні відмітки, напрямок загального ухилу), що позначається на гідрологічних й імовірно на гідрогеологічних її умовах, то можна констатувати розташування площадок № 1–3 та 5–22 у межах досить пласкої, проте слабогорбистої рівнини по обох берегах р. Оуед Тенсіфт. Зокрема, на **площадці спостереження № 1** земна поверхня покрита суглинком світлобурого кольору із домішкою каміння аргіліту (?) розміром близько 5–20 см. Площадка нещодавно штучно засаджена фініковими пальмами (Phoenix) зрілого віку, що мають середню висоту приблизно 8–10 м. Вочевидь пальми висаджені з метою створення сприятливого мікроклімату задля запобігання інтенсифікації процесів опустелювання і, як наслідок, деградації цієї території. Середня відстань між деревами — близько 20–25 м. Іноді між пальмами зустрічається рослинність різноманітних кущів сухостійких видів (*рис. 2, а*). Клас (ступінь) деградації місцевості визначено як 3-й.

**Площадка спостереження № 2** розташована приблизно в 250 м на захід-південний захід від площадки № 1 (тут і далі — по прямій лінії). Ґрунт на площадці також представлений суглинком світлобурого кольору. На його поверхні теж зустрічається каміння (аргіліт ?) розміром ~5–20 см. На площадці є штучно висаджені фінікові пальми зрілого віку із середньою висотою ~8–10 м та середньою відстанню між ними ~25 м (*рис. 2, б, в*). На відміну від площадки спостереження № 1 сухостійка кущова рослинність зустрічається тут частіше й покрив

її є густішим. Проте представників птаства не виявлено. Клас деградації місцевості площадки № 2 встановлено як 4-й.

**Площадка спостереження № 3** міститься у ~270 м на південний схід від площадки № 2. На площадці № 3, поверхня якої вірогідно вирівняна із втручанням людини за допомогою відповідної техніки, ґрунт суглинисто-піщанистий, світлобурого кольору. Пісок тонкозернистий. На поверхні ґрунту наявне також обкатане каміння (туф ?) світлозеленого та рожевого кольорів, розміром ~5–20 см (*рис. 2, г*). Фінікові пальми зустрічаються зрідка, натомість зростають різні низькорослі кущі стійких до посухи видів. Площадці надано клас деградації 2-й.

Приблизно у 100 м південніше від площадки № 3, власне на правому березі р. Оуед Тенсіфт локалізована **площадка спостереження № 4**. Долина річки в районі площадки пласка, має своєрідну заплаву шириною до 200 м. Існує постійний водотік. У день спостереження він представлений 2-3 окремими звивистими рукавами, шириною лише ~1–2 м кожен. Швидкість водотоку — ~0,5–1,0 м/с. Вода у кожному з рукавів є мутною, має сіре, злегка білувате забарвлення й дещо неприємний запах. Живих істот в ній не спостерігається, навіть представників земноводних. Вочевидь річка забруднена якимись речовинами, пов'язаними з антропогенною діяльністю вище за течією від площадки № 4.

Ґрунт у днищі річки глинисто-піщаний. На правому березі заплави, а також між її рукавами наявні добре обкатані галька і валуни, розміром переважно 5–20 см і 0,40–1,0 м відповідно. Зустрічаються валуни й більших розмірів, проте вони практично не обкатані (*рис. 2д*). Це є ознакою руйнування крутого схилу правого досить високого (до 2 м) берега й вимивання з нього валунів у періоди розливу і швидкої течії річки. Долина заросла переважно низькорослою трав'яною рослинністю, яка простежується лише в районі рукавів річки. Таким чином, клас деградації площадки оцінено як 4-й.

**Площадка спостереження № 5** розташована в ~570 м північно-західніше площадки № 4, що північніше долини р. Оуед Тенсіфт. Характеристика місцевості аналогічна до спостереженої в межах площадки спостереження № 1. Тобто ґрунт представлений суглинком світлобурого кольору, трапляється каміння аргіліту (?) розміром ~5–20 см, імовірно пов'язане з агротехнічними роботами на площадці. Адже вірогідно, що нещодавно площадка штучно засаджена фініковими пальмами зрілого віку. Дерева мають середню висоту ~8–10 м. Середня відстань між ними — ~20–25 м (*рис. 2, е*).

На відміну від площадки спостереження № 1 на площадці № 5 частіше зустрічаються осередки



а



б



в



г



д



е

**Рис. 2.** Фотографічні зображення місцевості в районі площадок спостереження: № 1 (а), № 2 (б, в — із зображенням автора під час роботи як масштабної одиниці, фото С. Голубова), № 3 (г), № 4 (д), № 5 (е)

кущів, вже засохлих, кожен із яких має діаметр у середньому ~1–2 м. Відстань між осередками — 1–3 м. Клас деградації місцевості в районі площадки № 5 — 3-й.

Місцеположення **площадки спостереження № 6** — у ~150 м на північний схід від площадки № 5. Це горизонтальна, техногенно вирівняна площадка розміром ~300×400 м. Поверхня її покрита суглинним (глинистим?) ґрунтом світлобурого кольору. Іноді на поверхні зустрічаються камені розміром ~10–40 см. Стосовно рослинності — у наявності зрідка кущі й молоді фінікові пальми (рис. 3, а). Отож, клас деградації в районі площадки — 2-й.

**Площадка спостереження № 7** знаходиться в ~700 м північно-західніше площадки № 6 у межах пласкої, явно техногенно вирівняної ділянки місцевості, густо покритої вочевидь завезеним камінням, імовірно представленим туфами (?), аргілітами (?) розміром від кількох міліметрів до 20 см. Каміння лежить на суглинистій основі (ґрунті) (рис. 3, б). На площадці іноді трапляються невисокі фінікові пальми і низькорослі кущі. На підставі візуально встановлених характеристик місцевості в районі площадки № 7 клас її деградації оцінено як 2-й.

У ~300 м західніше від площадки № 7 розташована **площадка спостереження № 8**. Вона зосереджена на пласкому невисокому пагорбі з пологими схилами, який гіпсометрично перевищує площадку спостереження № 7 на 5–7 м. Розміри власне пласкої поверхні пагорба — ~200×300 м. Імовірно пагорб антропогенного походження. Він штучно створений із завезеної і розгорнутої по площі маси суглинисто-кам'янистого матеріалу для покриття нею ділянки накопичення твердих побутових відходів (ТПВ).

Таким чином, поверхню пагорба із суглинним ґрунтом густо вкриває каміння (рис. 3, в). Як і на площадці № 7 це, ймовірно, туфи (?) й аргіліти (?) розміром п-мм–20 см. Рослинність представлена низькорослими кущами, що поширені по площі дуже рідко. Отже, район площадки № 8 має аналогічну до площадки № 7 характеристику місцевості, що й дозволило віднести її до 2-го класу деградації.

**Площадка спостереження № 9** міститься на відстані ~700 м на південний захід від площадки № 8. Тут спостерігається слабогорбиста рівнина із середньою висотою пагорбів 1–2 м, іноді 3 м. Ґрунт на площадці суглинистий, світлобурого кольору. Він покритий густим чагарником висотою 1,5–2,0 м (рис. 3, г). Площадці надано клас деградації 4-й.

По ходу маршруту між площадками спостереження № 9 і 10 було здійснено перехід через долину р. Оуед Тенсіфт із правого її берега на лівий. У місці перетину долина є пласкою, має ширину ~200 м.

Власне днище річки виявилось сухим, безводним, без ознак будь-якої рослинності. Натомість воно кам'янисте, покрите добре обкатаною галькою діаметром 10–40 см, що свідчить про періодичну наявність у долині швидкоплинного водотоку.

**Площадка спостереження № 10** розташована в ~400 м західніше площадки № 9. Місцевість тут, як і на площадці № 9, рівнинна, слабогорбиста. Ґрунтовий покрив суглинистий, має світлобуре забарвлення. Рослинність на площадці представлена чагарником висотою 2,0–2,5 м, рідшим і частіше представленим засохлими кущами, ніж це мало місце на площадці № 9 (рис. 3, д). Клас деградації площадки й прилеглої до неї району оцінено як 3-й.

По ходу маршруту між площадками спостереження № 10 і 11 з лівого берега р. Оуед Тенсіфт візуально оцінено характеристики обох її берегів. Береги круті, обривисті, терасовані. Отож, загальна їх висота складає 2 м + 3 м = 5 м. Днище річки має середню ширину ~30 м. Воно замулене глинисто-суглинним тонкодисперсним повністю висохлим матеріалом, який таким чином являє собою своєрідний такир (рис. 3е). Колір осадових утворень змінюється зі світлобурого (ближче до берегів річки) на світлокоричневий (в її центральній частині). Рослинність у днищі практично відсутня.

Фактично навпроти зображеної на рис. 3, е місцевості, на правому березі р. Оуед Тенсіфт зафіксовано **площадку № 11**. Це рівнинна площадка, реально антропогенно підготовлена з метою будівництва якогось або якихось техногенних або подібних до них об'єктів. Покрита площадка втрамбованим супіском, поверхня якого, можна сказати, понівечена грейдерами або бульдозерами, що зрізали нерівності рельєфу й залишили на ній глибоко врізані сліди від своїх коліс. Будь-яка рослинність на площадці відсутня (рис. 4, а). Отже, вона належить до 1-го класу деградації.

**Площадка спостереження № 12** міститься на лівому березі р. Оуед Тенсіфт. Як і розташована в ~300 м північніше площадка № 11, вона є рівнинною, також розчищеною під будівництво. Її покриває суглинок світлобурого кольору, а також засохла низькоросла трава (рис. 4, б). Клас деградації площадки — 2-й.

Між площадками спостереження № 12 і 13 по ходу маршруту, що проходив по лівому березі р. Оуед Тенсіфт, візуально оцінено долину річки загальом. Ширина дзеркала води тут практично не перевищує 20–25 м (рис. 4, в). Течія майже не виявляється. Вода має темнокоричневий колір і неприємний запах, що вірогідно зумовлено енергомасообмінними процесами та розвантаженням у русло річки із ґрунтових водоносних горизонтів



*a*



*б*



*в*



*г*



*д*



*е*

**Рис. 3.** Фотографічні зображення місцевості в районі площадок спостереження: № 6 (а), № 7 (б), № 8 (в), № 9 (г), № 10 (д); та зображення днища р. Оуед Тенсіфт між площадками спостереження № 10 і № 11 (е)



а



б



в



г



д



е

**Рис. 4.** Фотографічні зображення місцевості в районі площадок спостереження № 11 (а, фото М. Лубського) і № 12 (б); зображення долини р. Оуед Тенсіфт між площадками спостереження № 12 і 13 (в, у кадрі колеги С. Голубов і Т. Орленко на маршруті); зображення місцевості в районі площадок спостереження № 13 (г), № 14 (д, у кадр частково потрапив колега М. Лубський) і № 15 (е)

фільтрату, утвореного з наявних поблизу, покритих шаром інертних порід (суглинок, каміння, подрібнені рештки будівельних матеріалів тощо) карт твердих муніципальних відходів. Притаманний подібним об'єктам неприємний запах фіксувався одним з авторів статті (Азімов та ін., 2020; Azimov et al., 2023a) під час досліджень карт накопичення відходів полігона захоронення ТПВ № 5 поблизу м. Києва (між селами Підгірці й Креничі).

Проте по берегах річки виявлено колонії життєдатних невеликих за розмірами черепах. Отже, на ці рептилії критично не впливають наявні у фільтраті токсиканти, або ж концентрації їх не є небезпечними для життєдіяльності черепах. Можливо, що останні вже призвичаїлися до наявних у річці екологічних умов.

Береги річки пологі, ґрунт представлений суглинком світлобурого і бурого забарвлення. На берегах зростає кушова рослинність висотою до 1 м, яка збираючись в окремих місцях у своєрідні куртини, утворює чагарники (див. рис. 4в).

**Площадка спостереження № 13** розташована в ~750 м південно-західніше від площадки № 12 на пласкій рівнині, у межах якої рідко зустрічаються невисокі пагорби (їх висота не перевищує 1 м). Саме на пагорбах зростають різноманітні кущі, що місцями формують незначні за площею чагарники. Проте майже всі ці рослини виявилися засохлими. Також по площі рідко в наявності є засохлі або пригнічені у своєму розвитку фінікові пальми (мають багато сухого листя на верхівках) (рис. 4, з).

У межах площадки поверхня ґрунту, представленого суглинком бурого кольору, утрамбована. Вірогідно в її межах у попередні роки велася городня (сільськогосподарська) діяльність. Таким чином, площадці надано клас деградації 2-й.

На піщаній слабогорбистій рівнині проаналізовано характерні особливості **площадки спостереження № 14**, що міститься в ~900 м на північній захід від площадки № 13, західніше полотна залізничної магістралі Марракеш–Касабланка. Пісок на поверхні площадки дрібнозернистий, у перемішку з глиною, що надає суміші загального сіро-бурого кольору (рис. 4, д). Очевидно, що весь цей відносно пухкий матеріал на площадку завезений з метою штучного покриття сміттєзвалища ТПВ.

У межах площадки часто зустрічаються пагорби висотою 1,0–1,5 м. Власне лише до них приурочені невисокі кущі сухостійкої рослинності (висотою до 1 м). Однак вони вже виявилися засохлими (див. рис. 4, д). Отже, клас деградації площадки — 2-й.

**Площадка спостереження № 15** розташована в ~470 м південно-західніше попередньої, у межах слабогорбистої рівнини з відносною висотою наяв-

них пагорбів до 2 м. Площадка вкрита глинистим ґрунтом, засохлим, розтрісканим. Це свідчить про періодичну наявність поверхневої води в межах площадки і відповідну зволоженість ґрунту. Відтінки забарвлення останнього — світлобурі (рис. 4, е). На площадці зростають невисокі (~1,0–1,5 м) кущі, вже засохлі. Також наявні фінікові пальми без верхівок або (іноді) з пригніченим їх ростом. Загалом клас деградації площадки оцінено як 3-й.

*По ходу маршруту між площадками спостереження № 15 і 16 фіксувалися густі зарості чагарів, утворених різними видами кущів (висотою ~1,0–1,5 м) і низькорослих дерев (не перевищують 2,5 м), що на період досліджень виявилися повністю засохлими. Вони зростають на глинисто-суглинковому ґрунті світлобурого кольору (рис. 5, а).*

Приблизно в 270 м північно-західніше від площадки № 15 організовано **площадку спостереження № 16**. Вона являє собою слабогорбисту рівнину. Відносно перевищення розвинутих тут пагорбів — до 2 м. Площадку покриває глинисто-суглинковий ґрунт світлобурого кольору, а також переважно засохлі (висотою ~0,5–1,0 м), іноді ще зелені (висотою до 2 м) кущі (рис. 5, б). Клас деградації площадки — 3-й.

Далі маршрут проходив по лівобережжю р. Оуед Тенсіфт. *По ходу маршруту між площадками спостереження № 16 і 17 було здійснено підхід власне до лівого берега річки і якісно оцінено природні характеристики й екологічний стан як водойми зокрема, так і долини загалом. Отож, русло має ширину ~30–40 м. Схили берегів круті (~30–40°), складені світлобурим суглинком у перемішку з камінням різних розмірів. У схилі лівого берега спостерігається пологий ерозійний елемент із конусом виносу, поверхня якого повністю покрита камінням (рис. 5, в). Саме у цьому відносно запрудженому місці ширина водної поверхні русла звужується до кількох метрів.*

Власне вода у річці надзвичайно забруднена фільтратом чорно-бурого кольору (рис. 5, в, з), що потрапив до неї через підземні водоносні горизонти з майданчиків приповерхневої локалізації ТПВ. У чорний колір забруднені й нижні частини (висотою ~1 м) схилів обох берегів річки, що очевидно відбулося у періоди підйому в ній рівня води й збільшення швидкості її течії. У долині відчувається різкий, неприємний, пов'язаний із фільтратом запах. Відтак живих істот ні в річній водо-фільтратній суміші, ні на берегах долини не виявляється. Проте схили обох берегів поросли кущами висотою ~0,5–1,5 м та самотніми невисокими (~1,5–2,5 м) деревами, ще зеленими на період їх обстеження. На бортах долини ближче до "води" іноді зустріча-



а



б



в



г



д



е

**Рис. 5.** Фотографічні зображення: місцевості (зарості засохлого чагарнику) між площадками спостереження № 15 і 16 (а); місцевості в районі площадки спостереження № 16 (б); долини р. Оуед Тенсіфт між площадками спостереження № 16 і 17 (в, г); місцевості в районі площадок спостереження № 17 (д) і № 18 (е)

ються фінікові пальми висотою (~2,5–3,0 м) (див. рис. 5, в).

**Площадку спостереження № 17** закладено в ~330 м південно-західніше від площадки № 16. Вона являє собою слабогорбисту рівнину, в межах якої до пагорбів приурочені куртини кущів загалом розвинутого тут чагарнику. Кущі висотою до 2 м і більше зелені, іноді трапляються й сухі (рис. 5, д). Рівнина покрита глинисто-суглинистою осадовою породою світлобурого кольору. У районі площадки визначено 3-й клас деградації земель.

**Площадка спостереження № 18** розташована в ~950 м на захід-південний захід від площадки № 17. Це відносно пласка рівнина з наявністю поодиноких невисоких (до 0,5 м) пагорбів. Саме на них зростають кущі, які подекуди виявилися зеленими й мають висоту ~0,5–1,0 м, іноді 1,5 м. Однак здебільшого присутні вже засохлі кущі (рис. 5, е). Ґрунт на площадці глинисто-суглинистий, світлобурий. Зазначені характеристики дали підставу визначити клас деградації району площадки, як 2-й.

**Площадка спостереження № 19** локалізована в ~160 м південно-західніше від площадки № 18. Вона характеризується як слабогорбиста ділянка, основний ґрунт якої глинисто-суглинистий, бурого кольору. Площадка покрита стовбурами фінікових пальм. Майже всі дерева у пригніченому стані, тому що не мають верхівок або взагалі є засохлими. Опалі листя та верхні частини дерев рясно покривають землю (рис. 6, а, б). Між опалими рештками зустрічаються низькорослі, практично скрізь засохлі кущі. Представників пернатих помічено не було. Зважаючи на вказані особливості, клас деградації площадки оцінено, як 3-й.

У ~720 м на захід-південний захід від площадки № 19 відібрано район із **площадкою спостереження № 20**. Вона лежить в межах рівнинної місцевості, на глинисто-муловому ґрунті із світлобурими відтінками забарвлення. Поверхня ґрунту суха, але порепана. Це може вказувати на недавнє її добре зволоження накопичуваною тут поверхневою водою з атмосферних опадів і на наступне висихання й скріплення дрібнодисперсних частинок, що складають ґрунт.

Незважаючи на сухість ґрунту, на площадці фіксується відносно буйна зелена рослинність (рис. 6, в), серед якої насамперед відзначимо деревостан фінікових пальм висотою ~8 м і більше, різноманітні кущі висотою 1–2 м, високе різнотрав'я. Отже, клас деградації площадки — 4-й.

**Площадка спостереження № 21** розташована у ~470 м північно-західніше площадки № 20. У цьому місці чітко окреслюється блюдцеподібне зниження у рельєфі серед загалом пласкої земної поверхні.

Відносна глибина зниження оцінена в 1,0–1,5 м. У межах власне своєрідного “блюдця” помітні невисокі (до 1 м) і невеликі за розмірами пагорби. Як і в межах площадки № 20, глинисто-муловий ґрунт має тут гаму світлобурих кольорів (рис. 6, г).

Цей осередок місцевості покритий відносно густою, зеленою рослинністю: фініковими пальмами у гарному стані висотою 6–8 м, на яких є плоди фініків; кущами, висота яких іноді сягала 3 м; різнотрав'ям; вологолюбною осокою (*Carex*) (рис. 6, д). У хащах рослинності наявне співоче птаство. За результатами проведеного аналізу площадці надано клас деградації 4-й.

Нарешті, у ~230 м північніше площадки № 21, на межі із сільськогосподарським угіддям (зростала люцерна, оливкові дерева), що розляглося західніше, на рівнинній місцевості закладено **площадку спостереження № 22**. Тут виявлено глинисто-муловий ґрунт світлобурого кольору, на якому зростає відносно буйна зелена рослинність (рис. 6, е). Вона представлена фініковими пальмами у добрій кондиції (висотою 6–8 м), кущами (висотою 1–3 м), різнотрав'ям. Все це дало змогу оцінити клас деградації площадки, як 4-й.

Роботу на маршруті закінчено о 13 год. 30 хв. за місцевим часом того ж самого дня 15.10.2025 р. Температура повітря в тіні у цей час становила ~+35–36°C.

Таким чином, на пішохідному маршруті загальною довжиною понад 15 км відпрацьовано 22 площадки спостережень, особливості компонентів ландшафту на яких, а також на проміжках між якими охарактеризовано, сфотографовано, зафільмовано та описово задокументовано. Тож нижче узагальнимо отримані фактичні дані й систематизуємо та представимо їх у відповідній таблиці.

## РЕЗУЛЬТАТИ ПОЛЬОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

У процесі польових досліджень **стану кожного з компонентів ландшафту** в межах 22 площадок спостережень ці компоненти спочатку оцінювалися окремо один від одного, а потім у комбінації — як ландшафтний осередок місцевості загалом. Алгоритм інтеграції описово зафіксованих показників фактично полягав у авторському свого роду “сумуванні” якісно оціненого стану кожного з компонентів ландшафту на певній площадці спостереження і як наслідок проведення комплексного аналізу — у визначенні інтегрованого показника класу деградації земель у кількісній формі від 1-го (найбільш деградовані) до 5-го (практично недеградовані) (табл. 1). При цьому за так званий “етелонний” 5-й клас брався визначений нашими марокканськи-



а



б



в



г



д



е

**Рис. 6.** Фотографічні зображення місцевості в районі площадок спостереження: № 19 (а; б — із зображенням автора на маршруті для масштабування, фото С. Голубова), № 20 (в), № 21 (г, д) і № 22 (е)

Таблиця 1. Оцінка стану основних компонентів ландшафту в районі площадок спостережень на профілі І та класу деградації земель в їх межах

| Площадка спостереження | Компоненти ландшафту |                                  |                                |                  |                |                 |
|------------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------|----------------|-----------------|
|                        | рельєф               | гідрографічна та ерозійна мережі | грунт (приповерхневі відклади) | рослинний покрив | тваринний світ | клас деградації |
| № 1                    | ++                   | н/в                              | +                              | ++               | н/в            | 3               |
| № 2                    | ++                   | н/в                              | +                              | ++               | н/в            | 4               |
| № 3                    | +                    | н/в                              | +                              | +                | н/в            | 2               |
| № 4                    | ++                   | +                                | ++                             | +                | н/в            | 4               |
| № 5                    | ++                   | н/в                              | +                              | ++               | н/в            | 3               |
| № 6                    | +                    | н/в                              | +                              | +                | н/в            | 2               |
| № 7                    | -                    | н/в                              | -                              | +                | н/в            | 2               |
| № 8                    | -                    | н/в                              | -                              | +                | н/в            | 2               |
| № 9                    | ++                   | н/в                              | ++                             | ++               | н/в            | 4               |
| № 10                   | ++                   | н/в                              | ++                             | +                | н/в            | 3               |
| № 11                   | -                    | н/в                              | -                              | н/в              | н/в            | 1               |
| № 12                   | +                    | н/в                              | +                              | +                | н/в            | 2               |
| № 13                   | +                    | н/в                              | +                              | +                | н/в            | 2               |
| № 14                   | +                    | н/в                              | +                              | +                | н/в            | 2               |
| № 15                   | ++                   | н/в                              | +                              | +                | н/в            | 3               |
| № 16                   | ++                   | н/в                              | +                              | +                | н/в            | 3               |
| № 17                   | ++                   | н/в                              | +                              | +                | н/в            | 3               |
| № 18                   | +                    | н/в                              | +                              | +                | н/в            | 2               |
| № 19                   | ++                   | н/в                              | ++                             | +                | н/в            | 3               |
| № 20                   | ++                   | н/в                              | ++                             | ++               | ?              | 4               |
| № 21                   | ++                   | н/в                              | ++                             | ++               | +              | 4               |
| № 22                   | ++                   | н/в                              | ++                             | ++               | ?              | 4               |

Примітка. Стан компонентів ландшафту: — — вкрай незадовільний; + — незадовільний; ++ — добрий; н/в — не виявлено; ? — потребує уточнення.

ми колегами в межах оазисів якісно ж оцінений стан практично тих самих компонентів ландшафту, де основна увага приділялася згідно встановлених критеріїв стану рослинного покриву (особливо на наявність і ступінь розвитку дерев пальм).

Отож, трансформація якісної оцінки стану основних компонентів ландшафту, позначеної як «-», «+», «++» (тобто два «+»), у підсумковий кількісно виражений клас деградації здійснювалася таким чином. Якщо в сумарній оцінці стану передусім рослинного покриву і ґрунтів (приповерхневих відкладів) на площадці спостереження набиралося принаймні чотири знаки «+», то клас деградації земель в її межах визначався як 4-й, якщо три знаки «+» — то 3-й, якщо два знаки «+» — то 2-й. Ступінь природного або техногенно зміненого стану рельєфу земної поверхні брався до уваги як додатковий критерій,

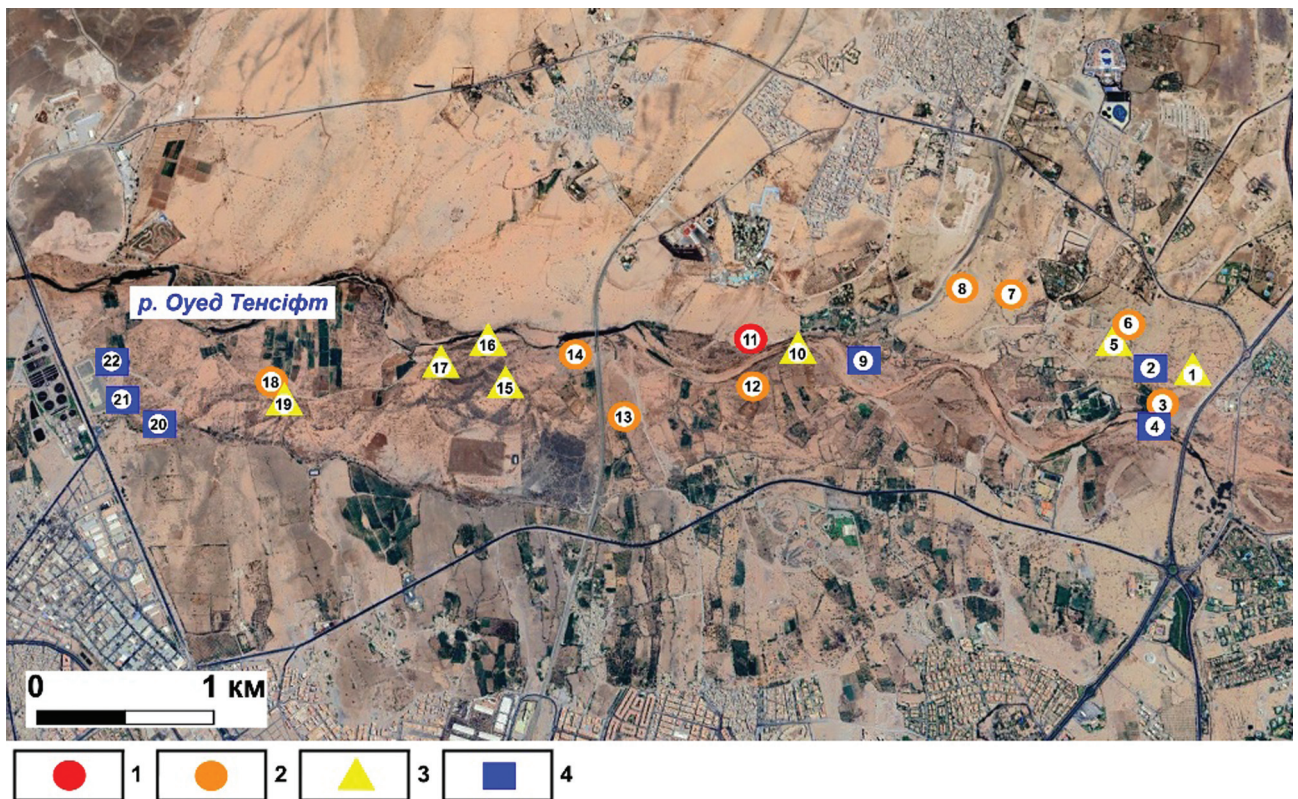
на підставі якого клас деградації в районі площадки міг бути підвищений або й знижений.

У процесі оцінювання особливостей форм **рельєфу** передовсім брався до уваги критерій їх збереженості у природному стані. У разі природного вигляду їх стан встановлювався як «добрий», що в табл. 1 позначається знаком «++». Натомість у разі антропогенного втручання в екосистему і особливо за наявності техногенних змін в її структурі, що найперше відображається у спотворенні натуральних форм рельєфу земної поверхні, стан останнього визначався як «незадовільний» (позначався знаком «+») або «вкрай незадовільний» (знак «-»). Зазвичай рельєф у межах таких площадок є горизонтально вирівняним (площадки спостережень № 3, 6, 7, 11, 12, 13, 14), або ж навпаки — у наявності є утворений явно штучний пагорб (площадка спостереження № 8).

Аналогічні оціночні критерії застосовувалися й при аналізі стану **ґрунтових утворень** або **приповерхневих відкладів** осадочного чохла у разі їх відслонення на денній поверхні. У межах більшості площадок спостережень території досліджень цей стан є «незадовільним» (знак «+» у *табл. 1*). Адже тут зазначені утворення покривають вже (агро) техногенно вирівняну поверхню земного рельєфу і є перемішаними із залягаючими нижче гірськими породами (з каменями туфу (?) й аргіліту (?) на площадках № 3, 5, 6, 7), або ж взагалі представлені вочевидь завезеними з інших місць чи то супіском (вже втрамбованим на площадці № 11), чи то масою різноманітного інертного матеріалу для покриття ділянки накопичення ТПВ (суглинисто-кам'яниста маса на площадці № 8 і піщано-глиниста на площадці № 14). Причому на площадках № 7, 8 і 11 покриття відповідними породами виглядає надзвичайно однорідним, що є підставою визнати їх стан як «вкрай незадовільний» (знак «-» у *табл. 1*). Отож, стосовно висунутих критеріїв оцінювання ґрунти і поверхневі породи в районі багатьох площадок спостережень вздовж профілю є зміненими. Це є вагомим аргументом у визначенні ступеня деградації земель в їх межах.

На противагу охарактеризованому вище техногенно зміненому, «незадовільному» та «вкрай незадовільному» стану, в межах декількох площадок спостережень території досліджень ґрунти і поверхневі осадові різновиди представлені у природному (геологічному) заляганні. Стосовно них зверталася увага на особливості їх зволоження, нехай і періодичного, що на рівнинній території досліджень передусім залежало від мікроскульптурних форм рельєфу. Таким чином, періодична наявність поверхневих вод у межах площадок № 20 і 21 є підставою віднести стан розвинутих тут ґрунтів і поверхневих відкладів до категорії «добрий» і в *табл. 1* позначити знаком «+++».

Цим же класом «добрий» стан ґрунтів і порід відзначено в районі площадок, що порівняно з іншими більшою мірою збагачені **рослинним покривом**. Вони вкриті різновидами рослинних угруповань, тіні від яких зменшують інтенсивність впливу сонячної радіації на «геологічну» поверхню і таким чином певною мірою запобігають випаровуванню з неї вологи. Так, на площадці спостереження № 9 зростає чагарник, на площадках № 20 і 22 крім буйної зеленої рослинності поширений також деревостан фінікових пальм, до якого на площадці № 21



**Рис. 7.** Картосхема розташування площадок спостережень (номери вказані арабськими цифрами у кружках білого кольору) на маршруті I із визначеними в їх межах класами деградації земель: 1 — 1-й клас (круг червоного кольору), 2 — 2-й клас (круг оранжевого кольору), 3 — 3-й клас (трикутник жовтого кольору), 4 — 4-й клас (квадрат синього кольору). Як підкладку використано космічний знімок, отриманий 21.08.2025 р. із супутника WorldView-2

додається ще й вологолюбна осока і наявність співо-чого птаства, як представника **тваринного світу**. Означені ботанічні й зоологічні особливості площадок є основою встановлення стану рослинного покриву в їхніх межах як «добрий» і позначити «++» (див. *табл. 1*). Проте менше за площею, відносно рідше покриття переважно засохлим чагарником площадки спостереження № 10 спонукало до визначення тут стану рослинності як «незадовільний». Також потрібно підкреслити, що в межах площадок № 20 і 21 потребує подальшого уточнення наявність пернатих, які вірогідніше за все повинні бути присутніми, зважаючи на сприятливі для них умови досить комфортного існування.

Таким чином, за результатами комплексного аналізу зібраного у маршруті I різнобічного матеріалу складено тематичну картосхему, що відображає просторовий розподіл районів (місцевостей) із різними ступенями деградації земель у межах дослідного полігону (*рис. 7*). Ретельний аналіз наведеного на *рис. 7* зображення з космічного апарата WorldView-2 від 21.08.2025 р. дозволяє ширше окреслити по площі локальні ділянки з відповідними деградаційними класами.

## ВИСНОВКИ З ДОСЛІДЖЕННЯ

Отже, на маршруті I відібрано і в польових умовах досліджено 22 площадки спостережень: візуально проаналізовано та документально зафіксовано в описах і в фотографічних та відеозображеннях стан основних компонентів ландшафту (рельєфу, гідрології, ґрунту, приповерхневих осадових порід,

рослинності, тваринного світу) як безпосередньо в межах площадок, так і на прилеглих до них районах та на місцевості між ними. Відповідні описові характеристики та найвиразніші зображення додано у створену в рамках ГІС базу даних. Визначено клас (ступінь) деградації земель у районі площадок. Так, на одній площадці обстеження клас деградації оцінено як 1-й, на восьми площадках — як 2-й, на сімох площадках — як 3-й, на шести площадках — як 4-й. Площадок із 5-м класом деградації земель у межах вивченої території не зафіксовано.

Отриманий фактичний матеріал (описовий, сфотографований, зафільмований) про особливості стану (розвитку, пригніченості, спотворення, забруднення токсикантами, зміни одних на інші, повної або часткової відсутності певних компонентів тощо) основних компонентів ландшафту розглянутої території в подальшому використовуватиметься для валідації (калібрування або завірки) результатів оцінювання та прогнозування ступенів деградації земель у її межах на підставі розроблених моделей і методів оброблення гіперкубу даних різної фізичної природи, зокрема й матеріалів багатоспектральних супутникових знімачів.

Робота виконується в рамках проекту “Система раннього попередження деградації земель порубіжжя Європейського Союзу на основі даних дистанційного зондування Землі” (Earth Observation for Early Warning of Land Degradation at European Frontier — EWALD); Grant Agreement No. ID 101086250 за програмою HORIZON (Earth...).

## ЛІТЕРАТУРА

- Азімов, О.Т. (2012). Методологія розрізнення диз'юнктивних дислокацій за матеріалами дистанційних зйомок. Ст. 7. Вимоги до наземних завіркових (калібрувальних) даних. *Зб. наук. пр. УкрДГПІ*, **1**, 113–119.
- Азімов, О.Т. (2024). Обґрунтування вибору полігонів, визначення їх критеріїв і параметрів для проведення досліджень з оцінювання вуглеводневого потенціалу надр шляхом комбінування геолого-геофізичної та аерокосмічної інформації. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*, **11**(1), 7–20. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.254>
- Азімов, О.Т., Коротинський, П.А., Колесніченко, Ю.Ю. (2006). Огляд поточного стану природно-техногенної безпеки в Україні та перспективи розвитку аналітичної інтерактивної системи моніторингу надзвичайних ситуацій засобами дистанційних, телематичних та ГІС-технологій. *Геоінформатика*, **4**, 52–66.
- Азімов, О., Кураєва, І., Трофимчук, О., Злобіна, К., Кармазиненко, С. (2020). Моніторингова оцінка якості поверхневих вод у районах захоронення твердих побутових відходів. *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Геологія*, **4**(91), 56–60. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.08>
- Азімов, О., Рогожин, О., Трофимчук, О. (2023b). Концептуальний підхід до створення системи інформаційного забезпе-чення робіт щодо поводження з геологічним середовищем у контексті локалізації твердих побутових відходів. *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Геологія*, **3** (102), 94–101. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.13>
- Abdel Rahman, M.A.E. (2023). An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rend. Lincei. Sci. Fis. Nat.*, **34**, 767–808, <https://doi.org/10.1007/s12210-023-01155-3>
- Amissah-Arthur, A., Mougnot, B., Loireau, M. (2000). Assessing farmland dynamics and land degradation on Sahelian landscapes using remotely sensed and socioeconomic data. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, **14**(6), 583–599. <https://doi.org/10.1080/136588100415756>
- Azimov, O., Karmazinenko, S., Kuraeva, I. (2023a). Chemical analysis of landfills leachate in the context of investigation its influence for hydrological ecosystems. *Proc. Int. Conf. of Young Professionals “GeoTerrace-2023” Lviv, Ukraine, 02–05 October*. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510082>
- Azimov, O.T., Rogozhin, O.G., Trofymchuk, O.M., Khrushchov, D.P. (2021). Geoinformation support for the management of the localization objects of municipal solid waste. *Proc. 20th EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, Ukraine, 11–14 May*. 1–8. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521169>

- Bouazzaoui, R., Hakdaoui, M., Zahour, G. (2016). Monitoring the evolution of the land cover of oasis through satellite images. Case: Oasis Zagora (Morocco). *Int. J. Adv. Res. (IJAR)*, **4**(3), 1918–1927. [www.journalijar.com](http://www.journalijar.com)
- De Jong, R., de Bruin, S., Schaepman, M., Dent, D. (2011). Quantitative mapping of global land degradation using Earth observations. *Int. J. Remote Sens.*, **32**(21), 6823–6853, <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512946>
- Earth observation for early warning of land degradation at European Frontier. <https://ewald-ecommo.hub.arcgis.com/>
- Farah, A., Algouti, A., Algouti, A., Ifkirne, M., Ezziyani, A. (2021). Mapping of soil degradation in semi-arid environments in the Ouarzazate basin in the south of the central High Atlas, Morocco, using sentinel 2A data. *Remote Sens. Appl.: Soc. Environ.*, **23**, art. no. 100548. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100548>
- Giuliani, G., Chatenoux, B., Benvenuti, A., Lacroix, P., Santoro, M., Mazzetti, P. (2020). Monitoring land degradation at national level using satellite Earth Observation time-series data to support SDG15 — exploring the potential of data cube. *Big Earth Data*, **4**(1), 3–22, <https://doi.org/10.1080/20964471.2020.1711633>
- Haboudane, D., Bonn, F., Royer, A., Sommer, S., Mehl, W. (2002). Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally-based information and digital geomorphometric attributes. *Int. J. Remote Sens.*, **23**(18), 3795–3820, <https://doi.org/10.1080/01431160110104638>
- Haidara, I., Hakdaoui, M., Maimouni, S., Mohcine, H., Moustarher, K. (2017, June). Spectral indexes to detect land cover changes due to the floods (Morocco). *Int. J. Adv. Res. (IJAR)*, **5**(6), 1141–1152, <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/4521>
- Halbac-Cotoara-Zamfir, R., Smiraglia, D., Quaranta, G., Salvia, R., Salvati, L., Giménez-Morera, A. (2020). Land degradation and mitigation policies in the Mediterranean region: A brief commentary. *Sustainability*, **12**(20), art. no. 8313. <https://doi.org/10.3390/su12208313>
- Hammouyat, A., Ichen, A., Elmalki, M., Chahhou, D. (2022). The degradation of forest areas in Morocco: Case of Benslimane province. *Biosyst. Divers.*, **30**(4), 388–396, <https://doi.org/10.15421/012238>
- Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., Stanley, D. (2013, June). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **80**, 91–106, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006>
- Ibrahim, Y., Balzter, H., Kaduk, J., Tucker, C. (2015). Land degradation assessment using residual trend analysis of GIMMS NDVI3g, soil moisture and rainfall in Sub-Saharan West Africa from 1982 to 2012. *Remote Sens.*, **7**(5), 5471–5494, <https://doi.org/10.3390/rs70505471>
- Karmaoui, A., Messouli, M. (2014). Environmental vulnerability to climate change and anthropogenic impacts in dryland, (Pilot study: Middle Draa Valley, South Morocco). *J. Earth Sci. Climat. Change*, **5**11, art. no. 02. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.S11-002>
- Khrushchov, D.P., Remezova, O.O., Azimov, O.T., Dolin, V.V., Shevchenko, O.L., Vasylenko, S.P. (2021). Theoretic basis of information support for R&D on geological environment management. *Proc. 20<sup>th</sup> EAGE Int. Conf. on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, Ukraine, 11–14 May*. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521095>
- Kirui, O.K., Mirzabaev, A., von Braun, J. (2021). Assessment of land degradation 'on the ground' and from 'above'. *SN Appl. Sci.*, **3**, art. no. 318. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04314-z>
- Lamqadem, A.A., Saber, H., Pradhan, B. (2018). Quantitative assessment of desertification in an arid oasis using remote sensing data and spectral index techniques. *Remote Sens.*, **10**(12), art. no. 1862. <https://doi.org/10.3390/rs10121862>
- Lyon, J.G., Yuan, D., Lunetta, R.S., Elvidge, C.D. (1998). A change detection experiment using vegetation indices. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **64**, 143–150.
- Nandi, S., Das, Soumyadeep, Gorain, S., Dutta, S., Choudhury, M.R., Das, S. (2025). Land degradation neutrality: a pathway to achieving sustainable development goals and ecosystem resilience. *Discover Soil*, **2**(1), art. no. 48. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00078-9>
- NASA Prediction of worldwide energy resources. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Orlenko, T., Kril, T., Azimov, O., Sadiq, B., Ibouh, H., Mezzane, D. (2025). Spatial analysis of landslide hazard and land degradation based on satellite-derived slope gradient and soil moisture: The Zagora province, Morocco. *Proc. 5<sup>th</sup> EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazard and Impact on Communities. Lviv, Ukraine, 18–21 September*. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520019>
- Petit, C., Scudder, T., Lambin, E. (2001). Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: Resettlement and rapid land-cover changes in south-eastern Zambia. *Int. J. Remote Sens.*, **22**(17), 3435–3456, <https://doi.org/10.1080/01431160010006881>
- Reith, J., Ghazaryan, G., Muthoni, F., Dubovyk, O. (2021). Assessment of land degradation in semiarid Tanzania — Using multiscale remote sensing datasets to support sustainable development goal 15.3. *Remote Sens.*, **13**(9), art. no. 1754. <https://doi.org/10.3390/rs13091754>
- Sujatha, G., Dwivedi, R.S., Sreenivas, K., Venkataratnam, L. (2000). Mapping and monitoring of degraded lands in part of Jaunpur district of Uttar Pradesh using temporal space borne multispectral data. *Int. J. Remote Sens.*, **21**(3), 519–531, <https://doi.org/10.1080/014311600210722>
- Symeonakis, E. (2022). Land degradation assessment with Earth observation. *Remote Sens.*, **14**(8), art. no. 1776. <https://doi.org/10.3390/rs14081776>
- Thiam, A.K. (2003). The causes and spatial pattern of land degradation risk in southern Mauritania using multitemporal AVHRR-NDVI imagery and field data. *J. Land Degrad. Dev.*, **14**(1), 133–142, <https://doi.org/10.1002/ldr.533>
- Tunçay, T., Başkan, O. (2022). Assessment of land degradation factors. In: *Vegetation dynamics, changing ecosystems and human responsibility*; L., Hufnagel and M.A., El-Esawi (Eds.). London, UK: IntechOpen, 385–404, doi: 10.5772/intechopen.107524
- Von Keyserlingk, J., Thieken, A.H., Paton, E.N. (2023). Approaches to assess land degradation risk: a synthesis. *Ecol. Soc.*, **28**(1), art. no. 53. <https://doi.org/10.5751/ES-13951-280153>
- Wessels, K.J., Prince, S.D., Frost, P.E., van Zyl, D. (2004). Assessing the effects of human induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sens. Environ.*, **91**(1), 47–67. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.005>
- Zkhiri, W., Trambly, Y., Hanich, L., Jarlan, L., Ruelland, D. (2019). Spatiotemporal characterization of current and future droughts in the High Atlas basins (Morocco). *Theor. Appl. Climatol.*, **135**(1–2), 593–605, <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2388-6>

## REFERENCES

- Abdel Rahman, M.A.E. (2023). An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rend. Lincei. Sci. Fis. Nat.*, **34**, 767–808, <https://doi.org/10.1007/s12210-023-01155-3>

- Amissah-Arthur, A., Mougnot, B., Loireau, M. (2000). Assessing farmland dynamics and land degradation on Sahelian landscapes using remotely sensed and socioeconomic data. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, **14** (6), 583–599. <https://doi.org/10.1080/136588100415756>
- Azimov, O.T. (2024). Justification of choosing the test sites, establishment of their criteria and parameters for the studies on hydrocarbon potential estimation of the interior of the earth by combining geological, geophysical, and aerospace information. *Ukr. J. Remote Sens.*, **11**(1), 7–20. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.254> [in Ukrainian with English abstract]
- Azimov, O.T. (2012). Methodology of disjunctive dislocations distinguishing via remote sensing data. Part 7. Ground verification (calibrating) data requirements. *Sci. Proc. UkrSGRI*, **1**, 113–119 [in Ukrainian with English summary]
- Azimov, O., Karmazinenko, S., Kuraeva, I. (2023a). Chemical analysis of landfills leachate in the context of investigation its influence for hydrological ecosystems. *Proc. Int. Conf. of Young Professionals "GeoTerrace-2023". Lviv, Ukraine, 02–05 October. 1–5.* <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510082>
- Azimov, O.T., Korotynskiy, P.A., Koliesnichenko, Yu.Yu. (2006). Review of the current condition of natural and technogenous safety in Ukraine and perspectives for the development of analytical interactive system for emergencies monitoring by the means of remote sensing, telematical and GIS-technologies. *Geoinformatics*, **4**, 52–66 [in Ukrainian with English summary]
- Azimov, O., Kuraeva, I., Trofymchuk, O., Zlobina, K., Karmazynenko, S. (2020). Monitoring assessment of the surface water quality within the areas for the municipal solid waste disposal. *Visnyk (Bull.) Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv: Geol.*, **4**(91), 56–60. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.08> [in Ukrainian with English abstract]
- Azimov, O., Rogozhin, O., Trofymchuk, O. (2023b). A conceptual approach to the creation of an information support system for the works related to the management of the geological environment in the context of the localization of municipal solid waste. *Visnyk (Bull.) Taras Shevchenko Nat. Univ. of Kyiv: Geol.*, **3**(102), 94–101. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.13> [in Ukrainian with English abstract]
- Azimov, O.T., Rogozhin, O.G., Trofymchuk, O.M., Khrushchov, D.P. (2021). Geoinformation support for the management of the localization objects of municipal solid waste. *Proc. 20<sup>th</sup> EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, Ukraine, 11–14 May. 1–8.* <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521169>
- Bouazzaoui, R., Hakdaoui, M., Zahour, G. (2016). Monitoring the evolution of the land cover of oasis through satellite images. Case: Oasis Zagora (Morocco). *Int. J. Adv. Res. (IJAR)*, **4**(3), 1918–1927. [www.journalijar.com](http://www.journalijar.com)
- De Jong, R., de Bruin, S., Schaepman, M., Dent, D. (2011). Quantitative mapping of global land degradation using Earth observations. *Int. J. Remote Sens.*, **32**(21), 6823–6853. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512946>
- Earth observation for early warning of land degradation at European Frontier. <https://ewald-ecommco.hub.arcgis.com/>
- Farah, A., Algouti, A., Algouti, A., Ifkirne, M., Ezziyani, A. (2021). Mapping of soil degradation in semi-arid environments in the Ouarzazate basin in the south of the central High Atlas, Morocco, using sentinel 2A data. *Remote Sens. Appl.: Soc. Environ.*, **23**, art. no. 100548. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100548>
- Giuliani, G., Chatenoux, B., Benvenuti, A., Lacroix, P., Santoro, M., Mazzetti, P. (2020). Monitoring land degradation at national level using satellite Earth Observation time-series data to support SDG15 — exploring the potential of data cube. *Big Earth Data*, **4**(1), 3–22. <https://doi.org/10.1080/20964471.2020.1711633>
- Haboudane, D., Bonn, F., Royer, A., Sommer, S., Mehl, W. (2002). Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally-based information and digital geomorphometric attributes. *Int. J. Remote Sens.*, **23**(18), 3795–3820. <https://doi.org/10.1080/01431160110104638>
- Haidara, I., Hakdaoui, M., Maimouni, S., Mohcine, H., Moustarher, K. (2017, June). Spectral indexes to detect land cover changes due to the floods (Morocco). *Int. J. Adv. Res. (IJAR)*, **5** (6), 1141–1152. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/4521>
- Halbac-Cotoara-Zamfir, R., Smiraglia, D., Quaranta, G., Salvia, R., Salvati, L., Giménez-Morera, A. (2020). Land degradation and mitigation policies in the Mediterranean region: A brief commentary. *Sustainability*, **12**(20), art. no. 8313. <https://doi.org/10.3390/su12208313>
- Hammouyat, A., Ichen, A., Elmalki, M., Chahhou, D. (2022). The degradation of forest areas in Morocco: Case of Benslimane province. *Biosyst. Divers.*, **30**(4), 388–396. <https://doi.org/10.15421/012238>
- Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., Stanley, D. (2013, June). Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **80**, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006>
- Ibrahim, Y., Balzter, H., Kaduk, J., Tucker, C. (2015). Land degradation assessment using residual trend analysis of GIMMS NDVI3g, soil moisture and rainfall in Sub-Saharan West Africa from 1982 to 2012. *Remote Sens.*, **7**(5), 5471–5494. <https://doi.org/10.3390/rs70505471>
- Karmaoui, A., Messouli, M. (2014). Environmental vulnerability to climate change and anthropogenic impacts in dryland, (Pilot study: Middle Draa Valley, South Morocco). *J. Earth Sci. Climat. Change*, **S11**, art. no. 02. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.S11-002>
- Khrushchov, D.P., Remezova, O.O., Azimov, O.T., Dolin, V.V., Shevchenko, O.L., Vasilenko, S.P. (2021). Theoretic basis of information support for R&D on geological environment management. *Proc. 20<sup>th</sup> EAGE Int. Conf. on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, Ukraine, 11–14 May. 1–5.* <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521095>
- Kirui, O.K., Mirzabaev, A., von Braun, J. (2021). Assessment of land degradation 'on the ground' and from 'above'. *SN Appl. Sci.*, **3**, art. no. 318. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04314-z>
- Lamqadem, A.A., Saber, H., Pradhan, B. (2018). Quantitative assessment of desertification in an arid oasis using remote sensing data and spectral index techniques. *Remote Sens.*, **10**(12), art. no. 1862. <https://doi.org/10.3390/rs10121862>
- Lyon, J.G., Yuan, D., Lunetta, R.S., Elvidge, C.D. (1998). A change detection experiment using vegetation indices. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **64**, 143–150.
- Nandi, S., Das, Soumyadeep, Gorain, S., Dutta, S., Choudhury, M.R., Das, S. (2025). Land degradation neutrality: a pathway to achieving sustainable development goals and ecosystem resilience. *Discover Soil*, **2**(1), art. no. 48. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00078-9>
- NASA Prediction of worldwide energy resources. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Orlenko, T., Kril, T., Azimov, O., Sadiq, B., Ibouh, H., Mezzane, D. (2025). Spatial analysis of landslide hazard and land degradation based on satellite-derived slope gradient and soil moisture: The Zagora province, Morocco. *Proc. 5<sup>th</sup> EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities. Lviv, Ukraine, 18–21 September. 1–5.* <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520019>
- Petit, C., Scudder, T., Lambin, E. (2001). Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: Resettlement and

- rapid land-cover changes in south-eastern Zambia. *Int. J. Remote Sens.*, **22**(17), 3435–3456, <https://doi.org/10.1080/01431160010006881>
- Reith, J., Ghazaryan, G., Muthoni, F., Dubovyk, O. (2021). Assessment of land degradation in semiarid Tanzania — Using multiscale remote sensing datasets to support sustainable development goal 15.3. *Remote Sens.*, **13**(9), art. no. 1754. <https://doi.org/10.3390/rs13091754>
- Sujatha, G., Dwivedi, R.S., Sreenivas, K., Venkataratnam, L. (2000). Mapping and monitoring of degraded lands in part of Jaunpur district of Uttar Pradesh using temporal space borne multispectral data. *Int. J. Remote Sens.*, **21**(3), 519–531, <https://doi.org/10.1080/014311600210722>
- Symeonakis, E. (2022). Land degradation assessment with Earth observation. *Remote Sens.*, **14**(8), art. no. 1776. <https://doi.org/10.3390/rs14081776>
- Thiam, A.K. (2003). The causes and spatial pattern of land degradation risk in southern Mauritania using multitemporal AVHRR-NDVI imagery and field data. *J. Land Degrad. Dev.*, **14**(1), 133–142, <https://doi.org/10.1002/ldr.533>
- Tunçay, T., Başkan, O. (2022). Assessment of land degradation factors. In: Vegetation dynamics, changing ecosystems and human responsibility; L., Hufnagel and M.A., El-Esawi (Eds.). London, UK: IntechOpen, 385–404, doi: 10.5772/intechopen.107524
- Von Keyserlingk, J., Thieken, A.H., Paton, E.N. (2023). Approaches to assess land degradation risk: a synthesis. *Ecol. Soc.*, **28**(1), art. no. 53. <https://doi.org/10.5751/ES-13951-280153>
- Wessels, K.J., Prince, S.D., Frost, P.E., van Zyl, D. (2004). Assessing the effects of human induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sens. Environ.*, **91**(1), 47–67. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.005>
- Zkhiri, W., Trambly, Y., Hanich, L., Jarlan, L., Ruelland, D. (2019). Spatiotemporal characterization of current and future droughts in the High Atlas basins (Morocco). *Theor. Appl. Climatol.*, **135**(1–2), 593–605, <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2388-6>

## RESULTS OF FIELD SURVEYS OF PLOTS FOR VALIDATION OF MONITORING ASSESSMENT OF LAND DEGRADATION IN THE KINGDOM OF MOROCCO BASED ON HETEROGENEOUS DATA.

### Article 1. PLAIN ARID TERRITORY

**Oleksandr Azimov**

ORCID 0000-0002-5210-3920

[azimov@casre.kiev.ua](mailto:azimov@casre.kiev.ua)

**Stanislav Golubov**

ORCID 0000-0003-3711-598X

[asdfieldspec3@gmail.com](mailto:asdfieldspec3@gmail.com)

**Mykola Lubskyi**

ORCID 0000-0002-3545-0007

[nickolo1990@gmail.com](mailto:nickolo1990@gmail.com)

**Tetiana Orlenko**

ORCID 0000-0002-4933-7750

[tetianaorlenko96@gmail.com](mailto:tetianaorlenko96@gmail.com)

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth  
of the Institute of Geological Sciences  
of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine

Field studies of the conditions of the landscape components of the territory were conducted within 22 observation sites planned

on the route (profile) along the Tensift River to northward of the city of Marrakech, Morocco. Features of their current state (development, suppression, distortion, toxic pollution, changes from one to another, complete or partial absence of certain components, etc.) have been characterized, photographed, filmed, and descriptively documented. The proper factual material has been entered into a database created within the framework of a geographic information system. As a result of a comprehensive qualitative analysis of the characteristics of the state of landscape components, they were transferred into a single quantitative parameter of the land degradation class of this area from the 1<sup>st</sup> (most degraded) to the 5<sup>th</sup> (practically not degraded). The algorithm for integrating the descriptively recorded indicators consisted of a kind of “summation” — devised by the authors — of the qualitatively assessed condition of each landscape component at a specific observation site; and, as a result of this comprehensive analysis, the determination of an integrated quantitative indicator of land degradation class. In this context, the so-called “reference” 5<sup>th</sup> class was taken as the qualitatively assessed state, within the oases, of practically the same landscape components, where the main focus of the criteria was on the condition of the vegetation cover (particularly the presence and development of palm trees). In the studied area, the 1<sup>st</sup> class of degradation was assessed at one survey site, at eight sites — as the 2<sup>nd</sup>, at seven sites — as the 3<sup>rd</sup>, at six sites — as the 4<sup>th</sup>. No sites with the 5<sup>th</sup> degree of land degradation were recorded within the studied area.

**Keywords:** Morocco, land degradation, environmental monitoring, observation sites, field studies.



# МЕТОДИ І ЗАСОБИ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

**П.Г. Пігулевський**

ORCID: 0000-0001-6163-4486  
pigulev@ua.fm

**С.О. Яремій**

ORCID: 0000-0001-6477-8899  
yaremiy0602@gmail.com

УДК 551.24:504

DOI:

## ДО ПИТАННЯ ВИВЧЕННЯ МЕХАНІЗМУ РОЗВАНТАЖЕННЯ НАДЛИШКОВИХ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОФІЗИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Інститут геофізики ім. С.І.  
Субботіна, НАН України, Київ  
Національний технічний  
університет "Дніпровська  
політехніка", Дніпро

*Робота присвячена дослідженню геофізичними методами впливу на гідрогеодинамічні процеси у геологічному середовищі Південного Кривбасу скидання значних об'ємів води з Карачунівського водосховища. Метою роботи була оцінка впливу гірничих робіт в кар'єрі на річку Інгулець. В моніторингових польових спостереженнях застосовано нетрадиційний для таких досліджень метод електророзвідки, а саме — метод природного поля та гравірозвідки. Встановлено, що різке підвищення рівня води в р. Інгулець спричиняє фільтрацію надлишкових поверхневих вод у осадовий чохол і тектонічно порушені зони, що змінює гідродинамічний стан порід і активізує зсувні процеси; показано залежність потенціалу та градієнту природного поля від процесів водонасичення та визначено роль тектонічних розломів у формуванні шляхів фільтрації вод. Наукова новизна полягає у підтвердженні ефективності методу природного поля для вивчення механізмів швидкого водонасичення геологічного розрізу та шляхів перетікання поверхневих вод у підземні, а також обґрунтовано можливість його використання у регламенті моніторингу підтоплення і при прогнозуванні розвитку зсувних процесів.*

**Ключові слова:** Кривбас, підземні води, річка Інгулець, гідрофільтрація, геофізичні спостереження, шахтні води, тектонічні зони.

### ВСТУП

Скидання величезних об'ємів шахтних вод та промивних талих вод у річки під час весняної повені на локаціях активного видобутку руди у Південному Кривбасі, впливає на затоплення територій та різкі зміни рівня ґрунтових вод. Це викликає швидкі гідродинамічні явища (Шевченко та ін., 2021), що активізують розвиток зсувів не лише на берегах річок, а й на бортах кар'єрів, відвалів та шламосховищ, завдаючи значної шкоди як самим підприємствам, так і сільськогосподарським угіддям та населенню (Пігулевський та Свистун, 2018; Pigulevskiy & Svistun, 2021). Згідно з методичними рекомендаціями розроблених нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти із зворотними водами (Методичні рекомендації..., 2021) було виконано у 2021 році скидання надлишків зворотних вод гірничорудних підприємств Кривбасу зі ставка-накопичувачу у балці Свистунова у р. Інгулець. Індивідуальним регламентом було передбачено порядок організації та проведення скиду надлишків зворотних вод зі ставка-накопичувача шахтних вод у б. Свистунова в р. Інгулець, тривалість і витрати попусків води з Карачунівського

водосховища в р. Інгулець (рис. 1). Згідно з регламентом робіт на 2021 рік з 21 березня по 20 жовтня було скинуто близько 160 млн м<sup>3</sup> води. Контроль за дотриманням вимог регламенту для розбавлення зворотних вод під час їх скиду, оцінка вмісту забруднюючих речовин виконувалася у тимчасових контрольних створах, що були встановлені на р. Інгулець під час здійснення скиду.

**Метою дослідження** було вивчення гідрогеодинамічних процесів у підземних водах при швидкому і значному підняттю рівня поверхневих вод та їх впливу на підтоплення кар'єру та розвиток зсувів на його бортах.

Завданням дослідження було вивчення змін у характеристиках потенціалу та градієнту природного поля і виявлення імовірної залежності від механізму інфільтрації надмірних поверхневих вод у геологічне середовище. Можливість їх використання для вивчення механізму швидкого водонасичення геологічного розрізу та визначення шляхів перетікання поверхневих вод у більш глибинні водоносні горизонти та у пустоту кар'єру.

На теперішній час в Україні досліджень по вивченню впливу гідродинамічних процесів при про-

мивки прісними водами із водосховища р. Інгулець після скидів високомінералізованих надлишків зворотних шахтних вод на розвиток зсувів на бортах кар'єрів кристалічних порід не виконувалося.

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У 2021 році в березні, квітні та липні (Pigulevskiy & Svistun, 2023) Дніпропетровською геофізичною експедицією "Дніпрогеофізика" були виконані моніторингові польові спостереження для оцінки впливу гірничих робіт у кар'єрі на річку Інгулець методами електророзвідки (різних модифікацій), природного поля (ПП) і гравірозвідки.

За результатами обробки даних польових геофізичних спостережень та раніше отриманих даних гідрогеологічних і геофізичних досліджень на території кар'єру і навколо нього за методикою порівняльно-статистичного аналізу, виявлено ознаки сучасних гідрогеодинамічних процесів у геологічному середовищі.

Під час досліджень 2021 року було вперше вивчено наслідки скидання величезних об'ємів води з Карачунського водосховища в річку Інгулець. Результатом цього було значне та швидке зростання рівня води в річці та перезволоження підземними водами схилів кар'єру і берегів річки (Pigulevskiy et al., 2023).

У липні 2023 року повторні спостереження було виконано на тих самих пунктах із застосуванням тієї ж методики (Pihulevskiy et al., 2025).

**Коротко про поверхневі водотоки.** Основною водною артерією регіону є р. Інгулець (рис. 1). Родовище, на якому виконувалися дослідження, розташоване у безпосередній близькості від річки, яка являється межею родовища на сході і півдні і знаходиться в 0,2 км від кар'єра. У сучасних умовах видобування відстань від р. Інгулець до робочих горизонтів кар'єра складає на півдні — 1520 м, на сході — від 730 м до 2380 м, на північному сході — 550 м (Кулькова та Гуляк, 2001).

Річка Інгулець маловодна, характеризується короткочасним підйомом рівня води під час весняних паводків та злив. Стік річки зарегульований греблею Карачунського водосховища (рис. 1), яке є основним джерелом питного водопостачання м. Кривий Ріг за мінералізації води 1,5–2,5 г/дм<sup>3</sup> (Гігієнічні нормативи якості води..., 2022). Обсяг зарегулювання значно перевищує природний стік річки. Мінералізація води в р. Інгулець на ділянці від гідропоста Кривий Ріг до гідропоста Андріївка складає 2,0–2,5 г/дм<sup>3</sup>, істотно зростаючи під час скидання шахтних вод до 8–9 г/дм<sup>3</sup>. Мінералізація та інші показники вод Інгульця стабілізуються ближче до літнього періоду і лише після промивки річки

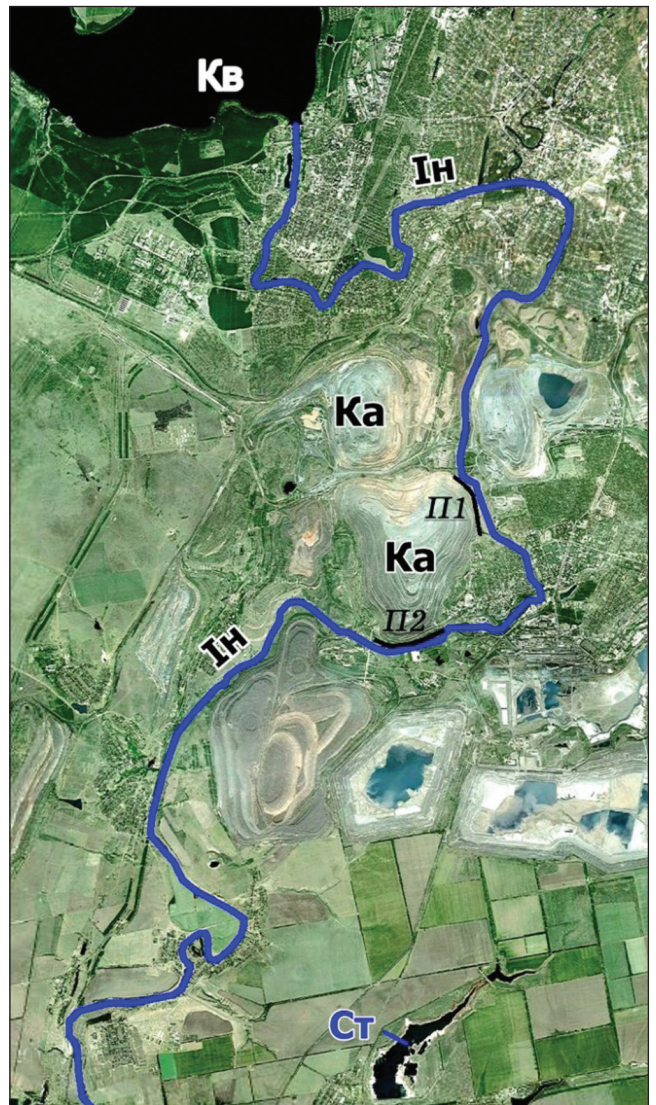


Рис. 1. Оглядова карта площі досліджень на основі космоснімку

Буквами позначено: Кв — Карачунівське водосховище; Ка — кар'єр, Ін — р. Інгулець; Ст — ставок шахтних вод в балці Свистунова; П1 та П2 — профілі спостережень.

дніпровською водою. Джерелом живлення р. Інгулець є атмосферні опади, підземний стік, а також пропуски із Карачунівського водосховища (Яцик та ін., 1991; Хільчевський та ін., 2012). Забруднювачами р. Інгулець є техногенні споруди гірничо-добувного комплексу Кривбасу. Основним джерелом забруднення є ставок-накопичувач шахтних вод у балці Свистунова (рис. 2), який має ємність 12,2 млн м<sup>3</sup> та площу дзеркала води 216 га. Рівні води у ньому змінюються залежно від режиму експлуатації; у зимовий час здійснюються скидання води до р. Інгулець. Зважаючи на наявність зон підвищеної проникності та можливих неотектонічних коливань, приурочених до розломів у земній корі, а також на високу мінералізацію шахтних вод, які скидаються



**Рис. 2.** Ставок-накопичувач шахтних вод у балці Свистунова

в став, ця водойма продовжує залишатися потенційно особливо небезпечним об'єктом для підземних вод району. Середня мінералізація води у ставку становить близько  $25\text{--}30\text{ г/дм}^3$ , а води, що скидаються із шахт можуть мати мінералізацію  $250\text{--}300\text{ г/дм}^3$  і більше (Кулькова та Гуляк, 2001; Багрій та ін., 2002).

Ємність ставка-накопичувача не дозволяє приймати та акумулювати весь об'єм зворотних шахтних вод, що призводить до переповнення цієї гідротехнічної споруди, порушує правила експлуатації та безпеки, а також спричиняє аварійний стан. Тому скидання забруднюючих речовин у р. Інгулець проводиться один раз на 1–2 роки.

**Коротко про підземні води.** За результатами гідрогеологічних досліджень попередніх років у межах території встановлено три водоносних горизонти, що приурочені до четвертинних, неогенових відкладів та тріщинуватих кристалічних порід. Підземні води кристалічних порід акумулюються головним чином у зонах тріщинуватості залізистих кварцитів, сланців, метапісковиків та інших порід криворізької серії, гідравлічно пов'язаних у єдину зону тріщино-пластових вод напірно-безнапірного типу. Основною областю розвантаження для всіх водоносних горизонтів і комплексу в наш час стали кар'єри. Напрямки потоків підземних вод у районах кар'єрів набули радіального характеру від периферії до центру депресії (кар'єру). Річка Інгулець, яка в природних умовах є областю розвантаження підземних вод, перетворилася в область додаткового живлення для дренажних кар'єром водоносних горизонтів (Кулькова, 2007).

На теперішній час довкола ставка-накопичувача шахтних вод у балці Свистунова утворився купол підняття рівнів підземних вод, який охоплює значну територію в радіусі 2–4 км. Унаслідок обводнен-

ня понтичних вапняків високомінералізованими водами активізувалися процеси карстоутворення, особливо в місцях залягання сильновивітрілих і тріщинуватих вапняків. Саме на таких ділянках спостерігаються карстові воронки, западини, просідання ґрунту, а також зсувні процеси. Всі ці явища були зафіксовані, на околицях с. Новоселівка, а також по бортах і в низов'ях балки Широка. Високий вміст солей властивий водам неогенового горизонту навколо балки Свистунова. Незважаючи на вжиті заходи з ізоляції днища балки, навколо неї зберігається ореол забруднених високомінералізованих ґрунтових вод, що свідчить про тривалі витоки з водоймища і конвективно-дифузійну міграцію солей. Мінералізація підземних вод навколо ставка коливається від 10 до  $14\text{ г/дм}^3$  і тип води змінюється від хлоридно-сульфатного магнієво-натрієвого до хлоридно-натрієвого (Кулькова та Гуляк, 2001; Багрій та ін., 2002).

Для оздоровлення русла річки Інгулець та її промивання від високомінералізованих шахтних вод, які потрапляють до неї, в тому числі з балки Свистунова, у 2021 році було виконано скидання з Карачунівського водосховища великого об'єму води. Згідно з регламентом робіт, з 21 березня по 13 квітня пропускна спроможність греблі становила  $20\text{ м}^3$  на секунду, з 14 квітня по 31 липня —  $10\text{ м}^3$ , а з 1 серпня по 12 вересня —  $7\text{ м}^3$  та з 13 вересня по 20 жовтня —  $3,5\text{ м}^3$ . Усього за цей період було скинуто близько  $160\text{ млн м}^3$  води (Pihulevskyi et al., 2023, 2025). При дослідженнях поведінки підземних вод під впливом стрімкого підйому рівня поверхневих вод були проаналізовані результати геологічних, гідрогеологічних спостережень і геофізичних зйомок, які проводилися в кар'єрі та навколо нього, до та в період скидання води з Карачунівського водосховища (рис. 1). Одночасні польові геофізичні дослідження виконувались методами електророзвідки, природного поля і гравірозвідки. Для отримання більш детальної інформації про складну будову рудних зон і зон тектонічних порушень, зсувів, насипних і штучних ґрунтів у південній частині кар'єру застосовувався метод електротомографії (Бобачов та ін., 2006; Pihulevskyi et al., 2023).

**Методика польових досліджень методом ПП.** Метод природного поля базується на дослідженні природних фізичних полів, що виникають у гірському масиві, зокрема електричних та електромагнітних полів, пов'язаних із рухом підземних вод. Його застосування дозволяє визначати зони з підвищеною проникністю та розущільненням, що суттєво впливає на стійкість бортів кар'єру.

Польові спостереження природного поля проводились способом градієнта по замкнених контурах

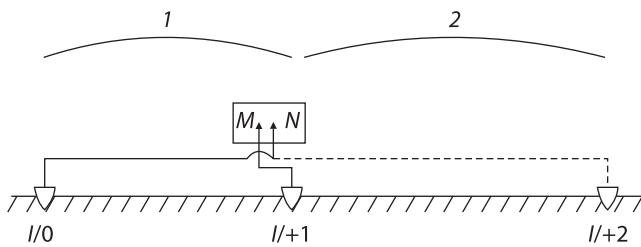


Рис. 3. Послідовність вимірів при зйомці методом градієнта (стоянка 1)

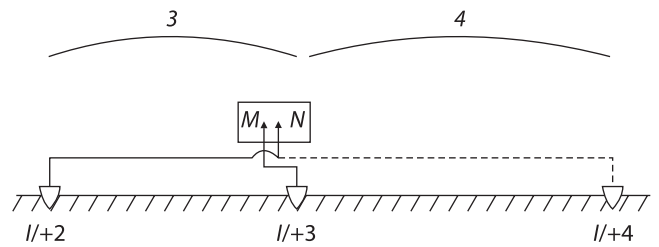


Рис. 4. Послідовність вимірів при зйомці методом градієнта (стоянка 2)

або ходах, прив'язаних до точок із відомими потенціалами геоелектричного поля Землі (Loke, 1999; Pihulevskiy et al., 2023). Спостереження виконані на кожному профілі з прив'язкою вимірів по кожному з них до першої та до кінцевих точок попереднього профілю. Схема вимірювань градієнта природнього потенціалу показана на рис. 3, 4.

Вимірювальний прилад установлювався біля одного з електродів, а клема М з'єднувалася з найближчим електродом коротким провідником довжиною 1,5–2 м. Другий електрод з'єднується із клемою N провідником, довжина якого складала 10 м. Вся установка переміщувалася по профілю спостережень. На початку робіт відпрацьовувався опорний полігон, до якого прив'язувались спостереження на інших профілях. Спостереження виконувалися за прямого та зворотного ходу вздовж досліджуваних профілів. Виміри на кожній точці сумувалися для отримання середнього значення у точці та мінімізації ефекту поляризації електродів. За такого порядку перестановки електродів їхня поляризація буде входити у виміри то з одним знаком, то з протилежним і при підсумовуванні вимірів при обчисленні потенціалів, погрішність за рахунок поляризації не буде накопичуватися. Довжина профілів спостережень коливалася в межах 1400–1600 м в залежності від вирішення геологічного завдання. Польові роботи виконувалися відповідно до вимог інструкції з електророзвідки (Інструкція з електротехнічних досліджень..., 1984). Загальна кількість точок з урахуванням повторних ходів та контролю склала 650. Середня відносна погрішність зйомки склала 4,6%. Повторні геофізичні спостереження були виконані у липні 2024 року за тією ж методикою та на тих самих пунктах із метою порівняння отриманих результатів.

**Топографо-геодезичні роботи** забезпечували на місцевості проектне розташування точок геофізичних спостережень, їх планову й висотну прив'язку, а також можливість виконання повторних спостережень у 2024 році за тими самими пунктами. Профілі розташовані на відрізках бортів, де максимально близько до кар'єру підходить р. Інгулець.

У ході робіт була застосована сучасна високоточна супутникова апаратура GPS, а саме: GPS приймач Trimble R3, GPS приймач Topcon GRS-1.

Профіль П1 знаходиться у північно-східній частині кар'єра, другий П2 — на півдні (рис. 1).

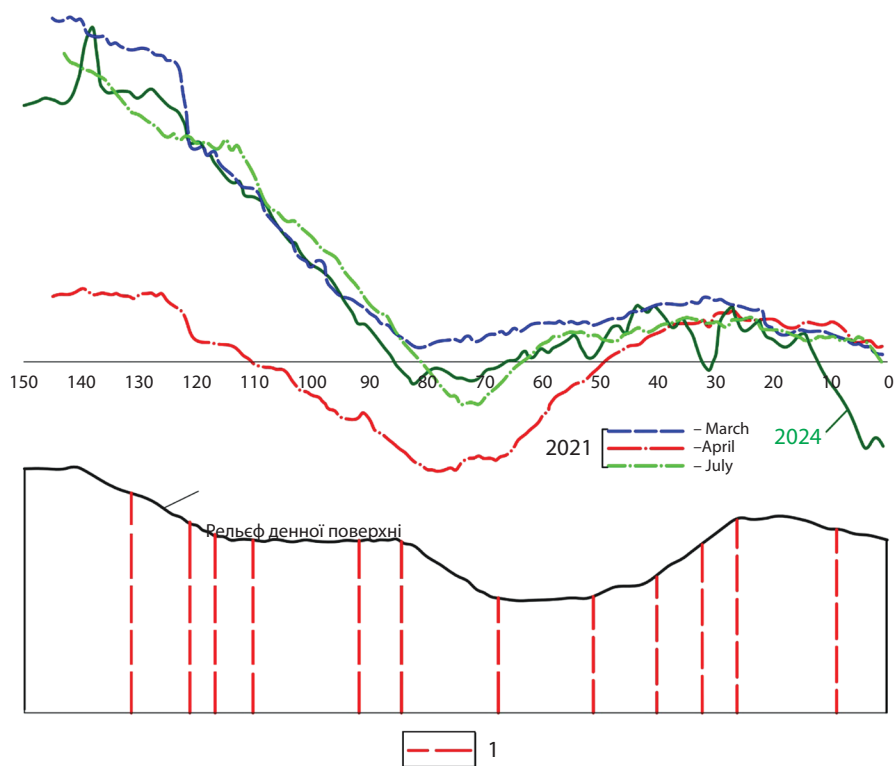
### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати польових спостережень способами потенціалу і градієнту були отримані з урахуванням замкнених контурів, прив'язаних до точок із відомими потенціалами. По кожному профілю були розраховані кількісні параметри потенціалів і градієнтів природнього поля (в мілівольтах), які наведені на (рис. 5, б).

У 2021 році, у березні, квітні та липні були проведені польові геофізичні спостереження для оцінки впливу гірничих робіт у кар'єрі на річку Інгулець (права притока Дніпра).

У результаті обробки польових геофізичних спостережень та раніше отриманих даних гідрогеологічних та геофізичних досліджень, космічної зйомки (Пігулевський та ін., 2018); (Pihulevskiy et al., 2025) у районі кар'єру та навколо нього було виявлено ознаки сучасних гідрогеодинамічних процесів в геологічному середовищі. Під час досліджень у 2021 р. вперше було вивчено вплив скидання величезних обсягів вод із Карачунівського водосховища в річку Інгулець, що спричинило значне та швидке підвищення рівня води в річці та перезволоження схилів кар'єру та берегів річки ґрунтовими водами.

Результати обробки комплексних геофізичних спостережень вздовж профілю П1 (рис. 5) показали дуже складну геологічну будову верхньої частини борту кар'єру. Слабомінералізовані води не досягають денної поверхні, а переважно знаходяться в ослаблених тектонічних зонах та в міжпластовому просторі. Їхній верхній край здебільшого розташований на глибинах від 3 до 5 м від поверхні. Обводнення у північно-східній частині профілю пов'язане з тріщинуватістю порід, розташованих поблизу тектонічної зони утвореної Тарапаківсько-Скелевацькою системою розломів (Мечников, 2002; Пігулевський та ін., 2018). Порівнюючи результати



**Рис.5.** Графіки зміни природного поля на північно-східному профілі П1 у 2021 та 2024 роках. Спостереження 21 березня, 14 квітня та 2 липня 2021 та 30 липня 2024 року (Pigulevskiy et al., 2023, 2025).

Умовні позначення: 1 — тектонічні порушення за даними геофізичних досліджень

польових спостережень у 2021 та 2024 роках, слід зазначити, що геоелектричний розріз став більш резистивним, що, ймовірно, пов'язано зі збільшенням геоелектричного опору геологічного розрізу під час сухої та спекотної погоди, яка тривала протягом червня-липня 2024 року.

Графіки ПП (рис. 5) показують високий електричний потенціал верхньої частини геологічного розрізу для збагачення водою в інтервалі пікетів ПК 96–145. Як показано на *рисунку*, до ПК 30 відсутня фільтрація річкової води в кристалічних породах, а далі на південь, разом зі збільшенням товщини осадового чохла, збільшується поглинання води пухкими породами. З часом геологічний розріз насичується водою, і процес поглинання переходить в усталений режим. Однак у межах профілю залишаються дві ділянки між ПК 65–80 та 125–145, де поглинання води продовжується. Загальна тенденція рівня природного поля за три роки з 2021 по 2024 рік не змінилася, за винятком двох ділянок між ПК 32–33 та 53–54, де відзначається сучасне водопоглинання, що свідчить про оновлення тектонічного розлому.

Поширення тріщинних вод по вертикалі геологічного розрізу з півночі (права частина розрізу) на південь (ліва частина) ймовірно пов'язано з субмеридіональними тектонічними розломами, які розташовані на захід від кар'єру. Під час скидання вод із Карачунівського водосховища для промивки р. Інгулець вони виконують роль підземних каналів

з повільним потоком. Це підтверджують ліва та права гілки графіків у березні та квітні (рис. 5). Глибина цих каналів обмежується розвитком тріщинуватих кристалічних порід у розломних зонах. Скидання води впливає на гідрогеодинамічний стан масивів прилеглих порід. Різка підняття рівня води в річці посилює геофільтраційні процеси в осадовому чохлі та тектонічних зонах, однак їх масштаби не змінюють сформовану систему взаємодії "річка – кар'єр".

Результати комплексної обробки спостережень та моніторингу природного поля вздовж профілю П2 на півдні кар'єру показані на *рис. 6*. Профіль має відносно низький геоелектричний опір, що пов'язано зі збільшеною товщиною осадового шару, який перебиває кристалічні породи фундаменту. Він зумовлює підвищене обводнення геологічного розрізу порівняно з профілем П1. Різкі зміни уявного опору вказують на переважання субвертикальних та крутонахилених розломів у геологічному розрізі. Найбільш обводнені породи залягають переважно на глибинах від 5 до 20 м. На заході профіля П2 між ПК 100–140 (рис. 6) відзначається обводнення верхньої частини розрізу. Воно простежується фрагментарними комірками, розташованими на різних рівнях, що може свідчити про наявність блочної відокремленості в тектонічній зоні розломів з вертикальними зміщеннями дрібних блоків у ній. Тут проходить потужна зона системи розломів, вздовж якої з півдня до кар'єру надходить вода з р. Інгулець.

Вздовж профілю П2 у межах ПК 43, ПК 21–23, ПК 9–10 у нижній частині розрізу, де залягають різноманітні кварцові піски (з включеннями гальки та жорстви), простежуються інтервали різної інтенсивності водопоглинання. Під ними, на глибинах понад 15–20 м, виділяються породи, більш стійкі до заболочування. Повторні спостереження показали, що протягом цього часу осадовий чохол був насичений водою, що призвело до підвищення рівня потенціалу ПП у східній частині профіля між ПК 1–43 (рис. 6). На графіках фіксується локальна ділянка, де поглинання надлишку річкової води продовжувалося і у липні 2021 року. Цей факт свідчить про наявність тут відкритого розлому, який забезпечує поповнення цього шару водою із заходу. Результати моніторингових спостережень у липні 2024 р. показують, що наповнення осадового шару водою завершилось і розпочався етап відносно рівноважних коливань рівня у режимі живлення-розвантаження.

За підсумками отриманих результатів встановлено, що при взаємодії фізичних чинників: по-перше, виявляються зони розущільнення та тріщинуватості, які характеризуються низькою щільністю та підвищеним значенням електропровідності через водонасиченість; по-друге, тектонічні порушення та зони обвалів корелюють із аномаліями природного електричного поля.

При цьому для математичного моделювання процесу рівняння потенціалу має вигляд:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0,$$

де  $\sigma$  — провідність середовища;  $V$  — електричний потенціал.

Аналіз потоку підземних вод:

$$Q = -K \cdot \nabla h,$$

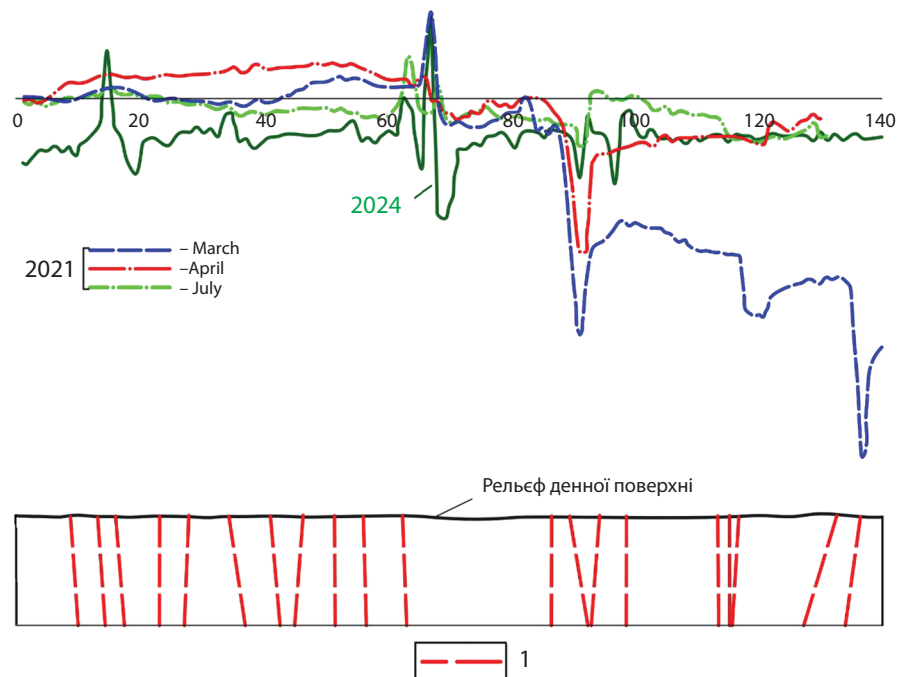
де  $Q$  — швидкість потоку;  $K$  — коефіцієнт фільтрації;  $h$  — гідравлічний потенціал.

Наведені результати досліджень показують, що фільтраційні потоки в зонах інфільтрації супроводжуються від'ємним потенціалом природного поля, а в зонах інфлюації або близько від них (ексфільтрації) — додатнім потенціалом. Ці потенціали можуть досягати, в залежності від інтенсивності фільтраційного потоку, перших десятків мілівольт.

Метод ПП, переважно, вирішує дві задачі при дослідженні процесів підтоплення та зсувів:

- ооконтурення порід різного літологічного складу, структури та тріщинуватості;
- визначення зон інфільтрації поверхневих вод і атмосферних опадів, а також зон ексфільтрації підземних вод у кар'єр.

Під час моніторингових спостережень метод ПП забезпечує можливість не лише оперативного вивчення гідрогеологічних умов розвитку зсувних процесів, але і фіксації моменту початку інтенсивного зволоження ґрунту, що важливо для своєчасного прийняття запобіжних інженерних рішень. При обладнанні вимірювального приладу блоком для передачі інформації в онлайн-режимі стає можливим визначати момент швидкого зволоження геологічного розрізу, що вивчається.



**Рис. 6.** Графіки зміни природного поля на профілі П2, отримані 21 березня, 14 квітня та 2 липня 2021 року та 30 липня 2024 року (Pigulevskiy et al., 2023, 2025).

Умовні позначення: 1 — тектонічні порушення за даними геофізичних досліджень

## ВИСНОВКИ

Результати моніторингових досліджень, які були отримані у березні, квітні та липні 2021 року та повторні — у липні 2024 року, розкрили перебіг гідрогеодинамічних процесів у осадовому чохла та тріщинному фундаменті при значному піднятті рівня поверхневих вод. Дослідження з використанням методу природного поля підтвердили можливість його використання для вивчення механізму швидкого водонасичення геологічного розрізу та визначення шляхів перетікання поверхневих вод у глибокі водоносні горизонти. Поведінка потенціалу та градієнту природного поля демонструє їх високу залежність від процесу фільтрації надлишкових (під час планових випусків води з гідровідвалів або спуску води з водосховища) поверхневих вод у геологічне середовище. Отже, знак та амплітуда ґрунтового потенціалу в області досліджуваних профілів адекватно відображають стан обводнення тріщин і вказують на перспективність застосування методу в районах із відкритими та закритими системами розломів.

Скидання води з Карачунівського водосховища для промивки р. Інгулець впливає на гідродинамічний стан масивів прилеглих гірських порід. Різке підняття рівня води в річці впливає на геофільтраційні процеси у верхній частині осадового чохла та в тектонічних зонах, але їх незначні розміри не відображаються на системі взаємодії "річка – кар'єр",

які склалися протягом багатьох років видобутку корисних копалин.

Затоплення прибережної території при промиванні річкових вод активізує гідродинамічні процеси, які впливають на розвиток зсувів не лише на берегах річок, а й на бортах кар'єрів, відвалів та шламосховищ, завдаючи значної шкоди як самим підприємствам, так і сільськогосподарським угіддям та населенню.

Механізм розвантаження надмірних поверхневих вод у геологічному середовищі може протікати за схемою:

із відкритою системою розломів — інфлюація надлишкових вод до покрівлі глибоких слаботріщинуватих або водотривких шарів з подальшим стіканням до кар'єрних виробок;

із закритою системою розломів — розповсюдження латерально по площі у міжпластовому просторі, з поповненням підземних вод, які акумулюються на водотривкому ложі.

Отримані результати можуть бути використані на початковому етапі моніторингу територій з активним розвитком зсувів для створення оптимальної мережі спостережень та визначення ділянок можливого первинного зсуву із подальшим використанням дорогих методів моніторингу. Метод ПП можна використовувати для вивчення процесів насичення та зневоднення зсувонебезпечних масивів порід у різних регіонах України та за її межами.

## ЛІТЕРАТУРА

- Багрій, І. Д., Блінов, П. В., Белокопитова, Н. А., Вілкул, Ю. Г., та ін. (2002). Геоекологічні проблеми Криворізького басейну в умовах реструктуризації гірничодобувної галузі. Фенікс.
- Бобачов, А. А., Горбунов, А. А., Модін, І. Н., та Шевнін, В. А. (2006). Томографія електричного опору та індуквана поляризація. *Прилади та системи геологорозвідувальної геофізики*, **2**, 14–17.
- Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення. (2022). Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 721 від 02 травня 2022 р.
- Інструкція з електротехнічних досліджень. (1984). Інструкція з електротехнічних досліджень. Надра.
- Крив'юк, І. В. (2014). Особливості методу природного електричного поля у комплексі геофізичних робіт під час дослідження зсувних процесів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, **1**(50), 190–199.
- Кулькова, Т. М. (2007). Гідрогеологічне довивчення площі масштабу 1 : 200 000 аркушу L-36-IV. Геоінформ.
- Кулькова, Т. М., & Гуляк, О. І. (2001). Моніторинг геологічного середовища Кривбасу (1996–2000 рр.). Геоінформ.
- Методичні рекомендації з розроблення нормативів гранично допустимого скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти із зворотними водами. (2021). Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України № 173 від 05 березня 2021р.
- Мечников, Ю. П. (2002). Неотектонічні рухи та їх вплив на геологічне середовище антропогенної екосистеми Кривбасу. Деякі чинники техногенезу. Серія: Геологічне середовище антропогенної екосистеми. Оксан-Прінт, 73–79.
- Пігулевський, П. Г., & Свистун, В. К. (2018). Геофізичні дослідження процесів підтоплення в промисловому Кривбасі. ФОП Мезіна В. В.
- Хільчевський, В.К., Кравчинський, Р.Л., Чунарьов, О.В. (2012). Гідрохімічний режим та якість води Інгульця в умовах техногенезу. Ніка-Центр.
- Шевченко О.Л., Долін В.В., Шабатура О.В. (2021). Гідрогеологія родовищ корисних копалин: підручник. Київ: ВПЦ "Київський університет".
- Яцик, А. В., Бишовець, Л. Б., Багатов, Є. О., та ін. (1991). Малі річки України. Урожай.
- Loke M.H. (1999). Time-lapse resistivity imaging inversion Proceedings of the 5th Meeting of the EEGS European Section, Em1.
- Pigulevskiy, P. I., & Svystun, V. K. (2021). Influence of technogenic objects on the development of landslides in the south of Kryvbass. *Third EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*, 1–5.
- Pihulevskiy, P., Svystun, V., Yaremii, S., & Anisimova, L. (2025). On the spatial positioning features of the first aquifer in the south of Kryvbass. *18th International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 1–5.

Pihulevskiy, P., Yaremii, S., Anisimova, L., Lohvyn, V., & Kyryliuk, O. (2025). Petrophysical features of the rocks of the sedimentary

cover of the Kryvyi Rih iron ore basin. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2025"*, 1–5.

## REFERENCES

- Bahriy, I. D., Blinov, P. V., Belokopytova, N. A., Vilkul, Y. G., et al. (2002). Geocological problems of the Kryvyi Rih basin in the context of restructuring of the mining industry. Kyiv: Fenniks. [in Ukrainian]
- Bobachev, A. A., Gorbunov, A. A., Modin, I. N., & Shevnin, V. A. (2006). Electrical resistivity tomography and induced polarization. *Instruments and Systems of Exploration Geophysics*, 2, 14–17. [in Russian]
- Instructions for electrical exploration. (1984). Nedra. [in Russian]
- Hygienic standards for water quality of water bodies for drinking, domestic and other needs of the population. (2022). Order of the Ministry of Health of Ukraine. No. 721.
- Khilchevskiy, V. K., Kravchynskiy, R. L., & Chunarov, O. V. (2012). Hydrochemical regime and water quality of the Inhulets River under technogenesis. Kyiv: Nika-Tsentr.
- Kryvyuk, I. V. (2014). Peculiarities of the natural electric field method in the complex of geophysical works during the study of landslide processes. *Exploration and development of oil and gas fields*, 1(50). 190–199. [in Ukrainian]
- Kulkova, T. M. (2007). Hydrogeological additional study of the area of scale 1:200,000 sheet L-36-IV. Geoinform. [in Ukrainian]
- Kulkova, T. M., & Hulyak, O. I. (2001). Monitoring of the geological environment of Kryvbas (1996–2000). Geoinform. [in Ukrainian]
- Loke M.H. (1999). Time-lapse resistivity imaging inversion Proceedings of the 5th Meeting of the EEGS European Section, Em1.
- Methodological recommendations for the development of standards for maximum permissible discharge of pollutants into water bodies with return waters. (2021). Order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine No. 173.
- Mechnikov, J. P. (2002). Neotectonic movements and their influence on the geological environment of the anthropogenic ecosystem of Kryvbas. In Some factors of technogenesis. Series: Geological environment of anthropogenic ecosystem Kryvyi Rih: Oktan-Print. 73–79. [in Ukrainian]
- Yatsyk, A. V., Byshovets, L. B., Bahatov, Ye. O., et al. (1991). Small rivers of Ukraine. Kyiv: Urozhai.
- Pihulevskiy, P. H., & Svystun, V. K. (2018). Geophysical studies of flooding processes in the industrial Kryvbas. Kharkiv: FOP Mezina V. V. [in Ukrainian]
- Pigulevskiy, P. I., & Svystun, V. K. (2021). Influence of technogenic objects on the development of landslides in the south of Kryvbas. In *Third EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities (September 20–23, 2021, Odesa, Ukraine)*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120xxx>
- Pihulevskiy, P., Svystun, V., Yaremii, S., & Anisimova, L. (2025). On the spatial positioning features of the first aquifer in the south of Kryvbas. In *18<sup>th</sup> International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 1–5.
- Pihulevskiy, P., Yaremii, S., Anisimova, L., Lohvyn, V., & Kyryliuk, O. (2025). Petrophysical features of the rocks of the sedimentary cover of the Kryvyi Rih iron ore basin. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2025" (October 6–9, 2025, Lviv, Ukraine)*, 1–5.
- Shevchenko O.L., Dolin V.V., Shabaturova O.V. (2021). Hydrogeology of mineral deposits: a textbook. Kyiv: VPC "Kyiv University".

## ON THE STUDY OF THE MECHANISM OF EXCESS SURFACE WATER DISCHARGE USING GEOPHYSICAL OBSERVATIONS

**Petro Pihulevskiy**

ORCID: 0000-0001-6163-4486

[pigulev@ua.fm](mailto:pigulev@ua.fm)

**Serhii Yaremii**

ORCID: 0000-0001-6477-8899

[yaremiy0602@gmail.com](mailto:yaremiy0602@gmail.com)

*S.I. Subbotin Institute of Geophysics,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

*Dnipro Polytechnic National Technical University, Dnipro*

*The study is devoted to investigating the impact of large-scale water discharge from the Karachunivske Reservoir on hydrogeodynamic processes within the geological environment of the Southern Kryvbas using geophysical methods. The main objective of the research was to assess the influence of mining activities in the open pit on the Inhulets River and adjacent geological structures. The research methodology is based on monitoring field observations carried out using geophysical techniques, including electrical prospecting, particularly the method of natural field (self-potential), as well as gravimetric surveys. The obtained results demonstrate that a sharp increase in the water level in the Inhulets River leads to intensive infiltra-*

*tion of excessive surface waters into the sedimentary cover and tectonically disturbed zones. This process significantly alters the hydrogeodynamic state of rocks and contributes to the activation of landslide processes within the study area. The analysis of geophysical data revealed a clear dependence of the natural field potential and its gradient on the processes of water saturation of the geological medium. In addition, the key role of tectonic faults in controlling the pathways of water filtration and redistribution within the subsurface has been established. It has been determined that in areas with open fault systems, water penetrates deeper into the geological section, whereas in zones with closed fault systems, it spreads laterally within interlayer spaces. These processes are reflected in the spatial distribution of geophysical parameters and confirm the sensitivity of the natural field method to changes in hydrogeological conditions. The scientific novelty of the study lies in confirming the effectiveness of the natural field method for investigating the mechanisms of rapid water saturation of geological formations and identifying pathways of surface water migration into underground horizons. Furthermore, the results substantiate the applicability of this method for environmental monitoring of flooded and landslide-prone areas, as well as for the optimization of observation networks and early detection of hazardous geological processes in mining regions.*

**Keywords:** Kryvbas, groundwater, Ingulets River, hydrofiltration, geophysical observations, mine waters, tectonic zones.

**О.В. Кошкіна<sup>1</sup>**

ORCID: 0009-0006-6407-6145  
olga.koshkina@ukr.net

**Є.В. Василенко<sup>1</sup>**

ORCID: 0009-0000-4681-6433  
evg.vasylenko29@gmail.com

**В.В. Гребінь<sup>1,2</sup>**

ORCID: 0000-0001-8197-607X  
grebin1964@gmail.com

**Т.В. Маслова<sup>1</sup>**

ORCID: 0000-0003-4058-9131  
tetjana\_maslowa@ukr.net

УДК 556.165(477)

DOI:

## ПОБУДОВА ІНТЕРПОЛЯЦІЙНОЇ ПОВЕРХНІ СЕРЕДЬОГО РІЧНОГО СТОКУ ВОДИ В МЕЖАХ РАЙОНІВ РІЧКОВИХ БАСЕЙНІВ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС-ІНСТРУМЕНТАРІЮ

*Україна запровадила інтегроване управління водними ресурсами за басейновим принципом, яке передбачає, що головною одиницею управління у галузі використання і охорони вод та відтворення водних ресурсів є район річкового басейну. Перед Україною постало завдання у розробленні та впровадженні Планів управління річковими басейнами (ПУРБ). Для аналізу однієї з складових ПУРБ є необхідними дані щодо середніх річних витрат води 50%-ої ймовірності перевищення у розрізі масивів поверхневих вод. Виконано побудову інтерполяційної поверхні розподілу середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення з використанням інструментарію геоінформаційних систем (ГІС). Побудована інтерполяційна поверхня дає можливість отримати значення середнього річного модуля стоку води в будь-якій її точці. Виконано аналіз отриманих значень для дев'яти районів річкових басейнів України.*

**Ключові слова:** модулі середнього річного стоку води, інтерполяційні поверхні, геоінформаційні системи, райони річкових басейнів України.

<sup>1</sup> Український  
гідрометеорологічний  
інститут, Київ, Україна

<sup>2</sup> Київський національний  
університет імені Тараса  
Шевченка, Київ, Україна

### ВСТУП

Відповідно до Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами Україна здійснює процес реформування системи управління водними ресурсами за вимогами Водної рамкової директиви ЄС (ВРД) (Директива 2000/60/ЄС, 2000). На шляху впровадження європейських стандартів з управління водними ресурсами розроблення та реалізація Планів управління річковими басейнами є одним із завдань, що передбачені планом заходів з виконання Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом. План управління річковим басейном розробляється з метою досягнення екологічних цілей, визначених для кожного району річкового басейну, в установлені строки. Стратегічною екологічною ціллю для всіх районів річкових басейнів є досягнення/підтримання "доброго" екологічного стану масивів поверхневих та підземних вод, а також "доброго" екологічного потенціалу штучних або істотно змінених масивів поверхневих вод. Однією із важливих складових ПУРБ є аналіз основних антропогенних впливів на кількісний та якісний стан поверхневих і підземних вод (Постанова Кабінету Міністрів України, 2017). Такий аналіз виконується для кожного

з визначених масивів поверхневих вод (МПВ), загальна кількість яких у межах всіх районів річкових басейнів України сягає понад дев'ять тисяч.

Забруднення, зумовлене діяльністю людини, може надходити від точкових джерел, які найчастіше являють собою місця скиду стічних вод, а також формуватися внаслідок змиву з водозбору під дією атмосферних опадів. Останні не мають конкретної локалізації і називаються розподіленими або дифузними джерелами.

Одним із необхідних елементів кількісного визначення емісійних потоків, зумовлених людською діяльністю, та встановлення ризику не досягнення "доброго" екологічного стану є водний стік річок, а саме середні річні витрати води 50%-ої ймовірності перевищення у розрізі масивів поверхневих вод (Вихрист та ін., 2018). Однак, існуюча в Україні мережа гідрологічних спостережень має незначну щільність і налічує лише 318 постів. Вказана диспропорція може бути вирішена розрахунковим методом шляхом побудови карти модулів стоку води для річкових басейнів України.

Отримана карта може бути використана для аналізу антропогенного навантаження та пов'язаного з ним впливу у розрізі окремих МПВ в рамках розроблення та оновлення Планів управління річковими

басейнами, а також буде корисною для вирішення багатьох завдань, пов'язаних з використанням інфраструктури про водний стік.

**Мета нашої роботи** полягає у побудові сучасної карти розподілу середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення для річок України з використанням ГІС інструментарію.

## СТАН ВИВЧЕННЯ ПИТАННЯ

Створення карт розподілу гідрологічних характеристик річок завжди було актуальним завданням в гідрології. Такі карти широко застосовуються для комплексного вивчення водних ресурсів та їх просторово-часового розподілу на різних територіях, особливо тих, які не охоплені пунктами гідрометеорологічних спостережень.

Основним методом представлення гідрологічних величин є побудова карт ізоліній, що широко застосовується у наукових дослідженнях і на сьогодні. Першу карту ізоліній норм річного стоку для європейської частини колишнього СРСР побудовано інженером Д.І. Кочеріним у 1927 р. (Кочерин, 1927). У 1946 році Б.Д. Зайков побудував карту ізоліній норми річного стоку, виражену в модулях стоку, а у 1948 р. подібна карта була створена для території Української РСР В.І. Мокляком (Кошкіна та Глотка, 2013).

На початку 2000-х років опубліковано низку наукових робіт українських вчених, таких як В.І. Вишневський (Вишневський, 2000), Є.Д. Гопченко і Н.С. Лобода (Гопченко та Лобода, 2001), В.В. Гребінь (Гребінь, 2010), в яких досліджено і здійснено картування середнього річного стоку річок України. Крім того, для Національного атласу України фахівцями Українського гідрометеорологічного інституту розроблено карту середнього багаторічного стоку річок за даними спостережень за 1950–2000 рр. (Руденко, 2007).

З розвитком геоінформаційних технологій геоінформаційні системи набули широкого застосування в гідрології, оскільки більшість гідрологічних завдань має виражений просторовий характер.

На сьогодні засобами ГІС-технологій вирішується декілька класів гідрологічних задач (Maidment, 2002; Gao, 2015; Tarboton et al., 1991; Zhu et al., 1997; Остроух, 2016): 1) створення та ведення гідрологічних баз даних; 2) визначення і уточнення гідрологічних і гідрографічних характеристик річок і їх басейнів; 3) цифрове картографічне моделювання для розрахунку гідрографічних і гідрологічних показників; 4) гідрологічний аналіз.

Кarti просторового розподілу гідрологічних характеристик річок побудовані за допомогою ГІС дають можливість визначити значення характеристик у будь-якій точці басейну річки.

Можливості геоінформаційних програм успішно використовуються вченими європейської країни (Sauquet et al., 2000; Vojtek & Vojteková, 2016; Mészáros et al., 2019), США (Beck, 2016; Bellamy & Cho, 2019), країн Азії (Liang & Greene, 2020; Zhan & Huang, 2004) та Африки (Salih & Hamid, 2017; Sishah, 2021) для картування шарів та модулів стоку води у різному часовому розрізі та для оцінки поверхневого стоку річок як на малих, так і на великих водозборах.

В останні роки все частіше зустрічаються роботи українських учених, де для гідрологічного дослідження річок України та представлення просторового розподілу річкового стоку та інших гідрометеорологічних характеристик застосовуються програми, які розроблені на основі ГІС (Архипова, 2011; Бурлуцька та ін., 2020; Величко та Дупляк, 2024; Шакірзанова та ін., 2018). Крім того, активно цим питанням займаються науковці Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України (Кошкіна та Глотка, 2013; Горбачова, 2017; Lobodzinskiy et al., 2023; Афтенюк та Горбачова, 2024) та вчені-гідрологи географічного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Лук'янець та ін., 2021; Почаєвець та Ободовський, 2019; Ободовський та ін., 2016).

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У роботі для візуалізації гідрологічних процесів використано програму ArcGIS, її інструменти ArcToolbox (Spatial Analyst, 3D Analyst та ін.) та розширення Geostatistical Analyst (ArcGIS 9, 2001), які застосовуються для аналізу растрових і тривимірних даних спостережень.

Процедура побудови карт складалася з двох основних етапів: автоматичної ідентифікації річкової мережі на основі цифрової моделі рельєфу (ЦМР) для оконтурювання суббасейнів гідрологічних постів та інтерполяції даних з гідрологічних постів на всю територію України.

Цифрова модель рельєфу є головним елементом будь-якої розподіленої гідрологічної моделі, оскільки дозволяє визначити морфометричні та гідрографічні характеристики річок і їх басейнів: тальвеги і вододіли, напрямки потоку, площі водозборів, порядки водотоків, тощо (Wu et al., 2002; Процик та ін., 2021). Так, у програму ArcGIS завантажено 29 фрагментів цифрової моделі рельєфу NASA SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Роздільна здатність SRTM складає одна кутова секунда (30 м). Для подальшої роботи із ЦМР всі фрагменти растру об'єднано в один із використанням інструменту "Mosaic" із набору інструментів Data Management Tools.

Розрахунок основних руслових і басейнових морфометричних характеристик здійснювався за допомогою лінійки інструментів “Гідрологія” (Hydrology) модуля Spatial Analyst на основі цифрової моделі рельєфу. В першу чергу для видалення великих помилок та похибок властивим даним, за допомогою інструменту “Fill” виконано заповнення локальних понижень в растрі поверхні. На основі вирівняної цифрової моделі рельєфу визначався напрямок потоку за допомогою інструменту “Flow Direction”, а також проводився розрахунок кумулятивних значень стоку (“Flow Accumulation”). Виділення тальвегів, а відповідно й водотоків здійснювався на основі растра акумуляції потоку з використанням інструменту “Raster Calculator”. На виході отримано бінарний растр із річковою системою. Для автоматизованого виділення водозборів створено новий точковий шар, в якому нанесено точки розташування гідрологічних постів на растрі сумарного стоку. Із використанням інструменту “Watershed” отримано растр із межами водозбірних басейнів для гідрологічних постів. Для подальшої роботи дані конвертовані у векторний формат за допомогою інструменту

“Raster To Polygon”. Фінальним етапом визначання водозбірних басейнів для кожного гідрологічного поста було уточнення та перевірка їх меж із використанням топографічної карти України масштабу 1 : 100000 (рис. 1).

Наступним кроком було визначення центрів тяжіння для водозборів кожного гідрологічного поста за допомогою використання інструменту “Feature to Point”. До визначених центрів водозборів прив’язувались значення розрахованих модулів стоку, оскільки стік води, визначений в межах гідрологічних постів, є усередненим для всього його водозбору.

Наступним етапом роботи була підготовка гідрологічного матеріалу. Так, для побудови карти середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення для території України використано дані спостережень за витратами води 325 гідрологічних постів, з яких 21 пост розташовано на території Республіки Молдова і два — на території росії. Використано гідрологічні пости з площею водозбору до 50 тис. км<sup>2</sup>. Гідрологічні пости з великими площами водозборів (понад 50 тис. км<sup>2</sup>) не врахо-

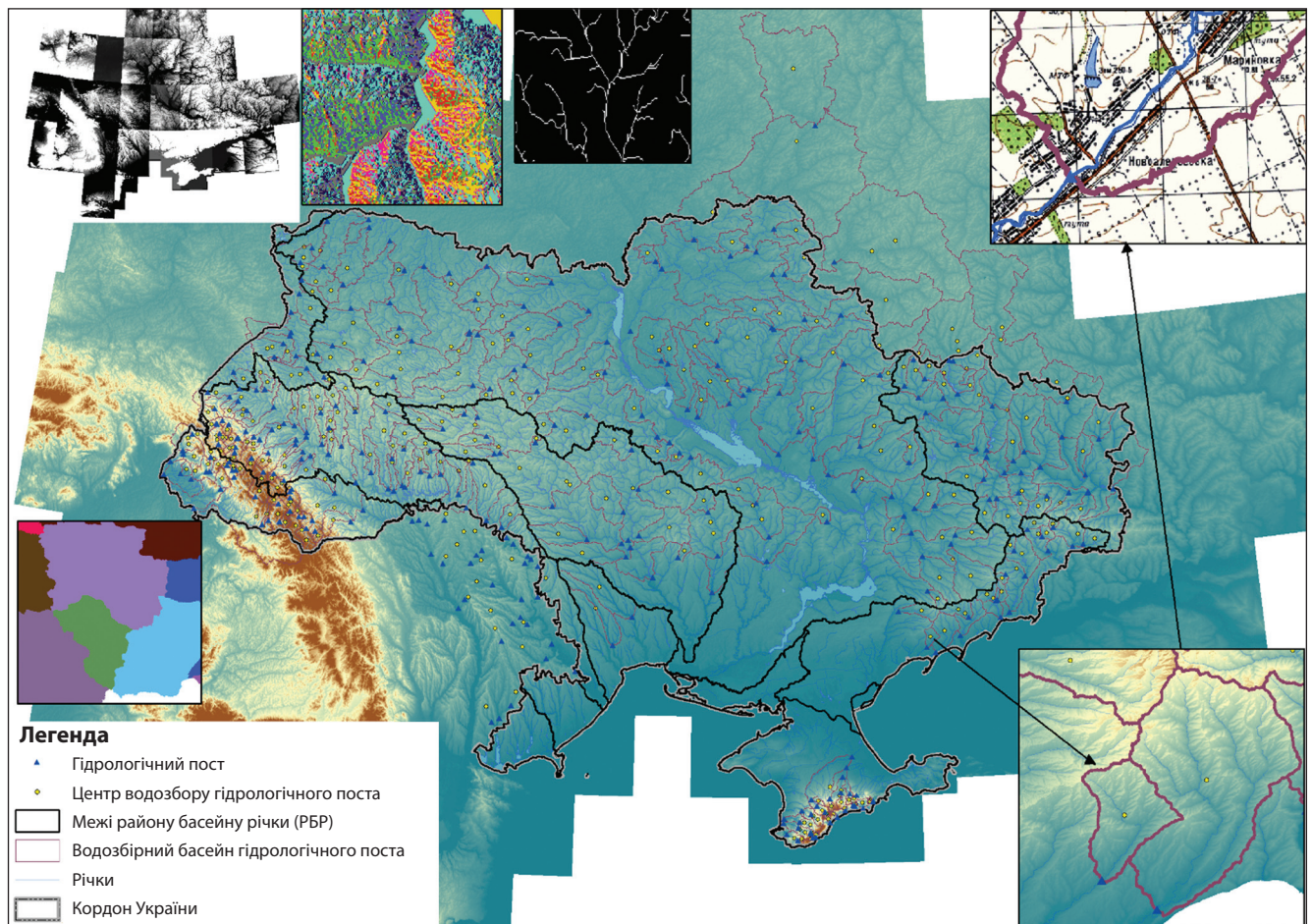


Рис. 1. Процедура визначення водозбірних басейнів та центрів їх тяжіння для гідрологічних постів

увались при побудові інтерполяційної поверхні. Це обумовлено тим, що значення модулів стоку для таких водозборів є інтегрованими (усередненими) та характеризують значні за площею території, що призводить до некоректної локалізації значень при їх прив'язці до центрів водозборів та згладжування інтерполяційної поверхні. Виключення таких постів дозволило забезпечити більш коректне відтворення локальних особливостей розподілу стоку та підвищити точність інтерполяції. Для визначення середніх річних витрат води 50-ої ймовірності перевищення використовувались гідрологічні ряди від початку спостережень до 2020 року.

Проведено аналіз просторово-часової однорідності та стаціонарності рядів середніх річних витрат води з використанням гідролого-генетичних (сумарні, інтегральні криві відхилень, суміщені хронологічні графіки) та статистичного (оцінка значимості лінійних трендів) методів (Горбачова, 2017). Результати статистичного аналізу на основі значимості коефіцієнту кореляції при 5% рівні значимості показали неоднорідність в середньому для 43% рядів середніх річних витрат води. Водночас аналіз гідролого-генетичними методами показав, що більшість із них можуть бути інтерпретовані як однорідні (квазі-однорідні) та стаціонарні (квазістаціонарні). Зокрема, сумарні криві середнього річного стоку не виявили суттєвих відхилень, за винятком річок із значним антропогенним навантаженням (наприклад, у басейні р. Південний Буг). Аналіз інтегральних кривих відхилень показав відсутність повних замкнених циклів водності на більшості гідрологічних постів, що вказує на вплив довгоперіодичних коливань стоку. Суміщені хронологічні графіки характеризуються переважно синхронною мінливістю та узгоджують-

ся з фізико-географічними умовами формування стоку. Отримані гідролого-генетичними методами результати свідчать, що встановлена статистичним методом неоднорідність зумовлена переважно довготривалими змінами гідрологічних характеристик, а не структурними змінами умов формування стоку (рис. 2).

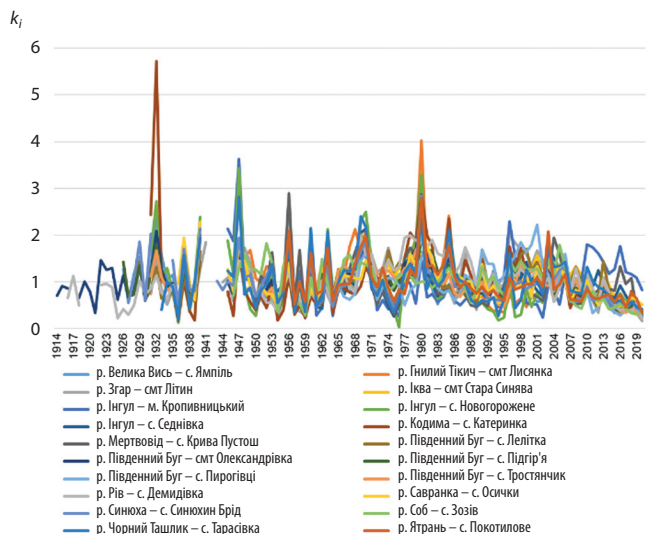
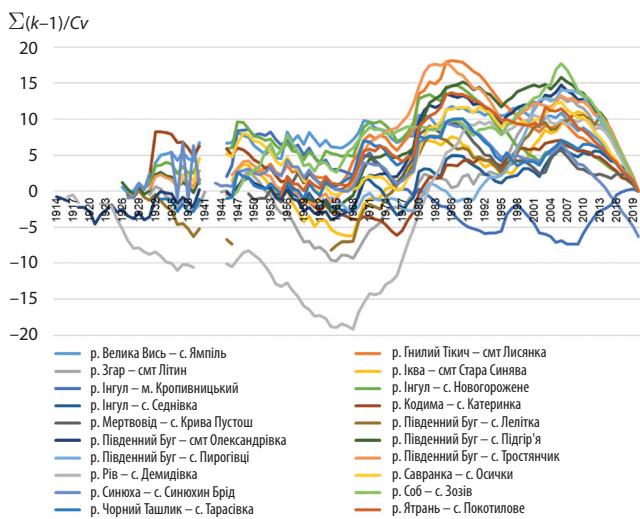
Відповідно до рекомендацій СНіП 2.01.14.83 середні річні витрати води 50%-ої ймовірності перевищення ( $Q_{n50\%}$ ) обчислювалися з використанням методів моментів і найбільшої правдоподібності (СНіП, 1983). Використання того чи іншого методу залежало від коефіцієнту варіації річного стоку гідрологічного поста. Так, якщо значення  $C_v$  становило  $\leq 0,5$ , для розрахунків застосовано метод моментів, а якщо  $> 0,5$  — метод найбільшої правдоподібності. Отримані розрахункові значення перераховувались у середні річні модулі стоку води 50%-ої ймовірності перевищення ( $M_{n50\%}$ ) за формулою:

$$M_{n50\%} = Q_{n50\%} \cdot 10^3 \cdot F^{-1}, \quad (1)$$

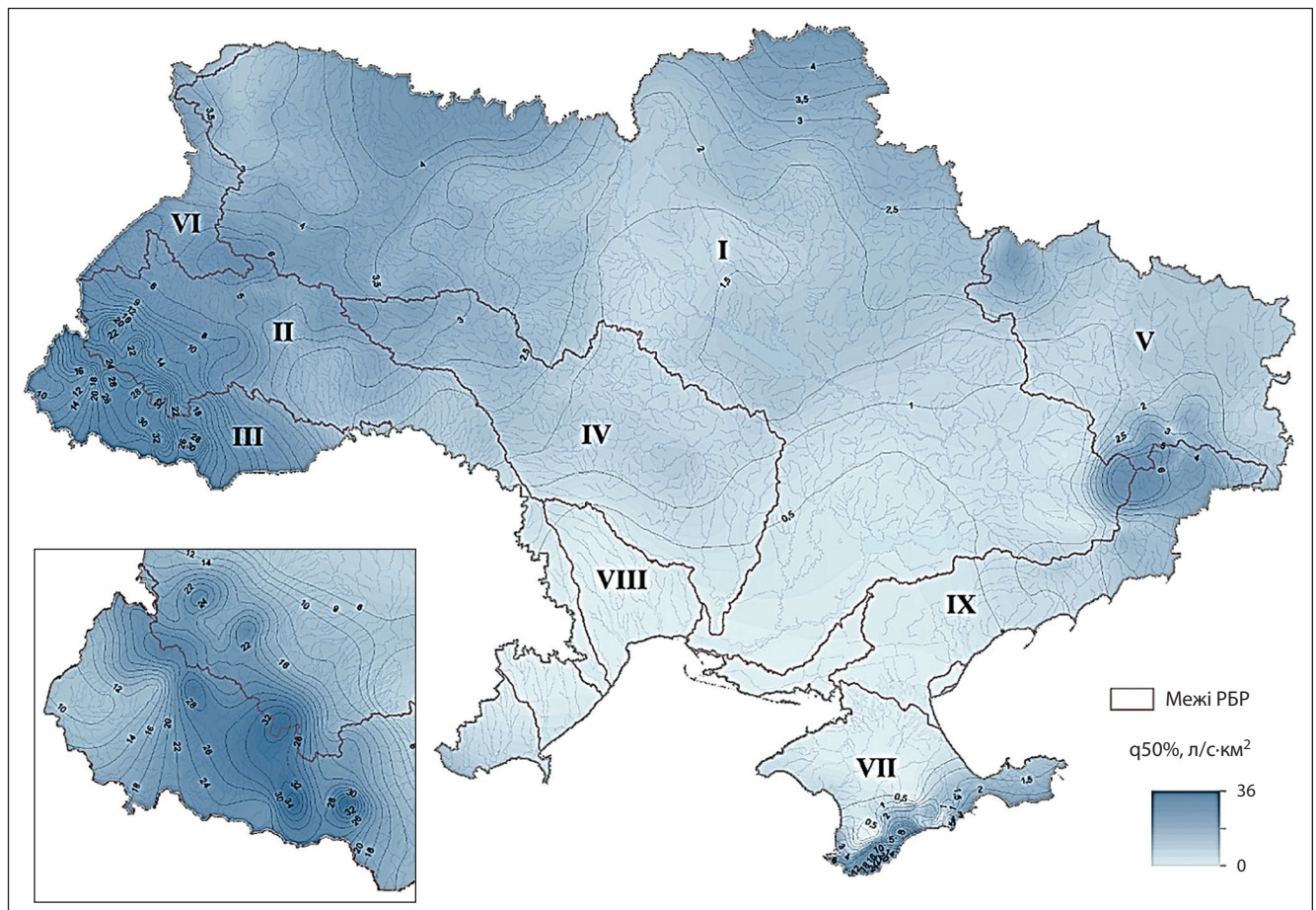
де  $F$  — площа водозбору гідрологічного поста, км<sup>2</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В науковій літературі немає жорстких рекомендацій щодо вибору того чи іншого методу інтерполяції гідрологічних характеристик. При виборі методу інтерполяції необхідно виходити з природи картографованої характеристики, особливостей і розмірів території, вирішуваних завдань, забезпеченості даними і їх властивостей. Остаточо обирається метод, що дозволяє створювати інтерполяційні поверхні, що відповідають вимогам по надійності отриманих результатів (Sokolchuk & Sokáč, 2022).



**Рис. 2.** Інтегральні криві відхилень та суміщені хронологічні графіки середнього річного стоку води на прикладі гідрологічних постів басейну р. Південний Буг



**Рис. 3.** Інтерполяційна поверхня розподілу середнього річного модуля стоку води 50%-ої ймовірності перевищення для території України: I — РБР Дніпро; II — РБР Дністер; III — РБР Дунай; IV — РБР Південний Буг; V — РБР Дон; VI — РБР Вісла; VII — РБР Криму; VIII — РБР Причорномор'я; IX — РБР Приазов'я

Інтерполяцію розрахованих даних середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення проведено в розширенні ArcGIS — Geostatistical Analyst / Geostatistical Wizard / Radial Basis Functions та побудовано неперервну поверхню розподілу модулів стоку води для території України (рис. 3). Метод радіальних базисних функцій використовується для побудови згладжених поверхонь для великої кількості опорних точок. Він належить до жорстких інтерполяторів, тобто, інтерполяційна поверхня деформується таким чином, щоб максимально точно пройти через дані точок спостережень. Запропонований метод є найбільш наближений до ручної інтерполяції, яку раніше застосовували в гідрології.

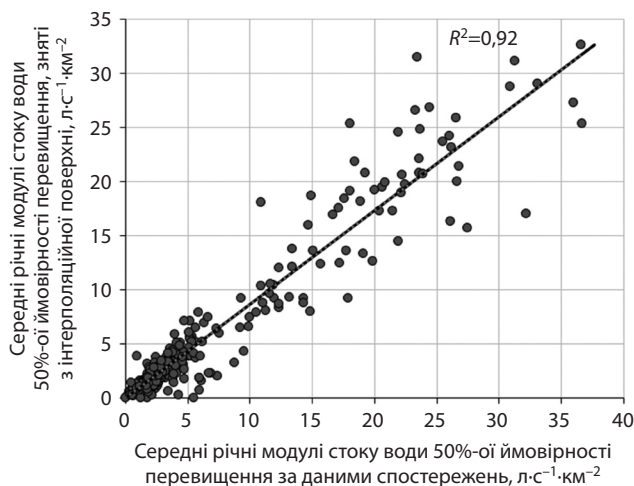
Побудована інтерполяційна поверхня дає можливість отримати значення середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення в будь-якій її точці, що дозволяє зменшити похибки при визначенні значень непрямыми методами.

Виконано перевірку побудованої інтерполяційної поверхні середніх річних модулів стоку води 50%-ої

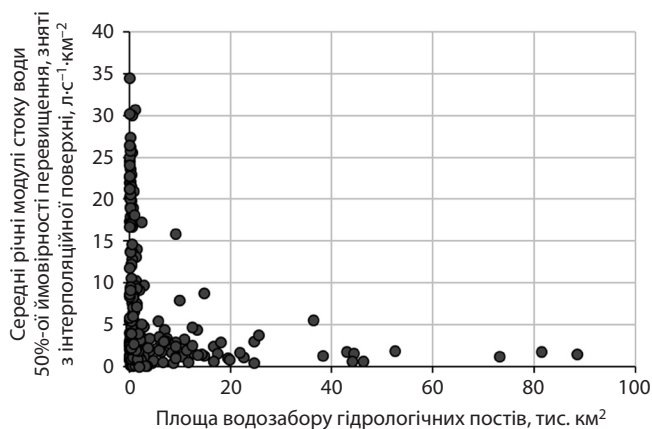
ймовірності перевищення шляхом аналізу кореляційних зв'язків між розрахованими значеннями модулів стоку з отриманими з інтерполяційної поверхні (рис. 4). Так, коефіцієнт кореляції порівнюваних значень становить 0,96, тобто отримано дуже тісний зв'язок, що підтверджує достовірність отриманих результатів. Крім того, відсутність зв'язків між площами водозборів гідрологічних постів та отриманими значеннями середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення свідчить про коректність побудови інтерполяційної поверхні (рис. 5).

Виконано аналіз побудованої інтерполяційної поверхні та отриманих з неї значень середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення для кожного з дев'яти районів річкових басейнів України (Дніпра, Дону, Дунаю, Дністра, Південного Бугу, Вісли, річок Приазов'я, Причорномор'я та Криму).

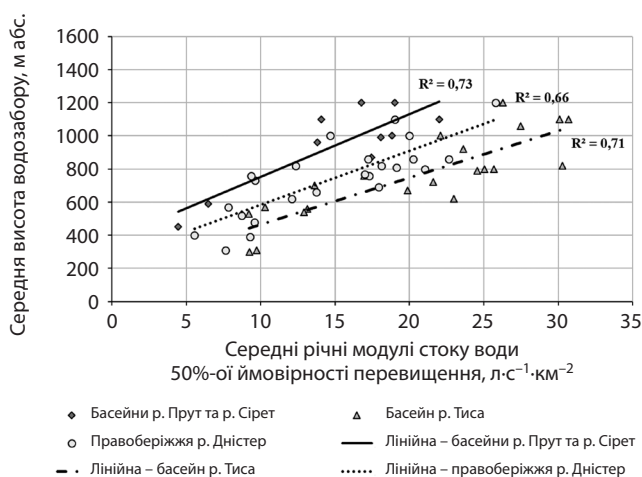
В районі басейну річки (РБР) Дніпро середній річний модуль стоку води 50%-ої ймовірності перевищення зменшується з півночі (більше 4 л/с·км<sup>2</sup>) на південь (менше 0,5 л/с·км<sup>2</sup>). РБР Дон характери-



**Рис. 4.** Графік зв'язку інтерпольованих значень із розрахованими значеннями середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення за даними гідрологічних постів



**Рис. 5.** Залежність інтерпольованих значень від площі водозборів гідрологічних постів



**Рис. 6.** Залежність середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення в межах Карпатського регіону від середньої висоти водозборів

зується коливанням модулів стоку води в межах від менше 1 л/с·км<sup>2</sup> до більше 6 л/с·км<sup>2</sup>. Найбільші його значення притаманні території Донецького кряжу (близько 11 л/с·км<sup>2</sup>). В межах РБР Приазов'я середні річні модулі стоку зменшуються в південно-західному напрямку та становлять менше 0,5 л/с·км<sup>2</sup>. Тільки на північному сході, де басейн межує з Донецьким кряжем, модулі стоку води досягають значень більше 6 л/с·км<sup>2</sup>. Значення середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення в РБР Причорномор'я не перевищують 0,5 л/с·км<sup>2</sup>. Лише верхів'я річок Тилігул та Великий Куяльник мають модулі стоку води 0,5-1 л/с·км<sup>2</sup>. РБР Південний Буг характеризується зменшеннями модулів стоку води з північного заходу на південний схід від більше 4 л/с·км<sup>2</sup> у верхів'ї басейну річки до менше 0,5 л/с·км<sup>2</sup> в його гирловій частині. Найбільші значення модулів стоку в межах РБР Вісли відмічаються у верхів'ї річки Західний Буг (більше 6 л/с·км<sup>2</sup>), а також у південній частині річкового басейну, які розташовані в межах Волино-Подільської височини. Найменші значення досліджуваної характеристики спостерігаються в північній частині РБР Вісла (менше 3 л/с·км<sup>2</sup>). Район басейну річки Дністер та РБР Дунай проходять у межах Карпатського регіону, який має висотний вплив на розподіл середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення, що підтверджується отриманими залежностями на рисунку 6. Так, правобережні притоки верхньої частини Дністра характеризуються модулями стоку води 6–22 л/с·км<sup>2</sup>. У напрямку до гирла річки модулі стоку води зменшуються (менше 0,5 л/с·км<sup>2</sup>).

РБР Дунай в межах України поділяється на чотири суббасейни. Середні річні модулі стоку води 50%-ої ймовірності перевищення в суббасейні річки Тиса коливаються в межах 10–34 л/с·км<sup>2</sup>. Суббасейні річок Прут та Сірет характеризуються зменшенням модулів стоку води із заходу на схід від 30 до 2 л/с·км<sup>2</sup> та 12–5 л/с·км<sup>2</sup> відповідно. Значення модулів стоку води у суббасейні Нижнього Дунаю становлять менше 0,5 л/с·км<sup>2</sup>. Район басейну річок Криму характеризується найбільшими величинами модулів стоку води в районі Кримських гір (0,5–22 л/с·км<sup>2</sup>), а на решті території річкового басейну його значення становлять менше 0,5 л/с·км<sup>2</sup>.

Просторовий розподіл отриманих значень середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення в межах України відповідає фізико-географічним умовам, широтній зональності та висотній поясності.

## ВИСНОВКИ

Використовуючи сучасні методи ГІС технологій отримано цифрову модель рельєфу, визначе-

но водозбірні басейни гідрологічних постів та їх центри тяжіння, побудовано інтерполяційну поверхню середніх річних модулів стоку води 50%-ої ймовірності перевищення для території України. Виконано перевірку достовірності інтерпольованих значень модулів стоку води шляхом їх порівняння з розрахованими за даними спостережень гідрологічних постів. Проаналізовано коливання середніх річних модулів стоку води в межах дев'яти районів річкових басейнів України. Просторовий розподіл досліджуваної характеристики підпорядковується фізико-географічній зональності та висотній поясності. Отримана інтерполяційна поверхня дозволяє позбутися суб'єктивних чинників і автоматично отримувати значення в будь-якій точці. Крім того, дозволяє компенсувати просторову неоднорідність

гідрологічних спостережень, забезпечує можливість деталізованого аналізу водних ресурсів у розрізі масивів поверхневих вод та є важливим інструментом для планування водогосподарських заходів.

Створена інтерполяційна поверхня успішно була використана під час аналізу антропогенного навантаження та його впливів для масивів поверхневих вод в районі басейну річок Дніпра та його суббасейнів, а також для РБР Дністер та РБР Дон з метою розроблення плану управління цими басейнами. Розроблена інтерполяційна поверхня може бути використана під час розробки та оновлення Планів управління для решти річкових басейнів України, а також для оцінювання екологічного стану водних об'єктів відповідно до європейських підходів.

## ЛІТЕРАТУРА

- Архипова, Л.М. (2011). Природно-техногенна безпека гідро-екосистем: Монографія. Івано-Франківськ.
- Афтенюк, О.О., Горбачова, Л.О. (2024). Просторовий розподіл розрахункових характеристик основних фаз льодового режиму річок басейну Прип'яті в межах України з використанням ГІС. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, **1**(71), 30–40. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.1.3>
- Бурлуцька, М.Е., Романчук, М.Є., Погорелова, М.П. (2020). Норма річного стоку в басейні річок Приазов'я. *Екологічні науки*, **6**(33), 16–22. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.6-33.2>
- Величко, С., Дупляк, О. (2024). Використання програмного комплексу QGIS для визначення гідрологічних характеристик. Досвід використання в навчальному процесі. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, **47**, 4–11. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.47.4-11>
- Вихрист, С., Мудра, К., Осійський, Е., Скоблей, М., Ярошевич, О. (2018). Методичні рекомендації щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод. <https://www.davr.gov.ua/fls18/mvod1.pdf>
- Вишневецький, В.І. (2000). Річки і водойми України. Стан і використання. Київ: Фірма "ВІПОЛ".
- Гоченко, Є.Д., Лобода, Н.С. (2001). Оцінювання природних водних ресурсів України за методом водно-теплого балансу. *Наукові праці УкрНДГМІ*, **249**, 106–119.
- Горбачова, Л.О. (2017). Гідролого-генетичний аналіз просторово-часових закономірностей водного стоку річок України: методологія, тенденції, прогноз. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук: 11.00.07. Київський національний університет імені Т. Шевченка, Київ.
- Гребінь, В.В. (2010). Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ: Ніка-Центр.
- Державний комітет СРСР у справах будівництва. (1983). Определение расчетных гидрологических характеристик (СНиП 2.01.14-83). Москва.
- Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради "Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики". (2000). [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_962#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text)
- Кочерин, Д.И. (1927). Средний многолетний годовой и месячный сток в Европейской части Союза. *Труды Московского ин-та инженеров транспорта*, **6**, 10–26.
- Кошкіна, О.В., Глотка, Д.В. (2013). Просторовий розподіл гідрометеорологічних характеристик весняного водопілля в басейні р. Десна з використанням ГІС. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*, **264**, 64–71.
- Лук'янець, О.І., Ободовський, О.Г., Гребінь, В.В., Почаєвець, О.О., Корнієнко, В.О. (2021). Просторові закономірності зміни середнього річного стоку води річок України. *Український географічний журнал*, **1**(113), 6–14. <https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.006>
- Ободовський, О.Г., Лук'янець, О.І., Коноваленко, О.С., Корнієнко, В.О. (2016). Середній річний водний стік річок Українських Карпат та особливості його територіального розподілу. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, **4**(43), 25–32.
- Остроух, О.А. (2016). Закономірності змін хімічного складу ґрунтових вод Чоп-Мукачівського басейну. Автореф. дис. ... канд. геол. наук: 04.00.06. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.
- Постанова Кабінету Міністрів України "Про затвердження Порядку розроблення плану управління річковим басейном" (2017). Отримано 21 січня 2026 із <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/336-2017-%D0%BF#Text>
- Почаєвець, О., Ободовський, О. (2019). Використання ГІС для оцінки просторового розподілу мінімального стоку води річок басейну Тиси в межах України. *Фізична географія і геоморфологія*, **3**(95), 18–25. <https://doi.org/10.17721/phgg.2019.3.02>
- Процик, М., Четверіков, Б., Дорожинський, О., Іваневич, А. (2021). Методика автоматизованого виділення водозбірних басейнів за цифровими моделями рельєфу (на прикладі Сколівського району Львівської області). *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, **93**, 72–84. <https://doi.org/10.23939/istcgscap2021.93.072>
- Руденко, Л.Г. (ред.). (2007). Поверхневі води та водні ресурси (карти № 4–6, розд. 8). *Національний атлас України*. Київ: ДНВП "Картографія".
- Шакірзанова, Ж.Р., Бойко, В.М., Гопцій, М.В., Тодорова, О.І., Докус, А.О., Сербова, З.Ф., Швець, Н.М. (2018). Метод прогностичної оцінки характеристик гідрологічного режиму річок басейну Дніпра у весняний період року. *Український гідрометеорологічний журнал*, **22**, 80–99.
- ArcGIS 9. GeostatisticalAnalyst: User guide. (2001). Redlands (CA): ESRI Press.

- Beck, H. E. (2016). A global map of mean annual runoff based on discharge observations from large catchments (Technical report). <https://doi.org/10.5281/zenodo.44782>
- Bellamy, P. W., Cho, H. J. (2019). A GIS-based approach for determining potential runoff coefficient and runoff depth for the Indian River Lagoon, Florida, USA. In *Lagoon environments around the world: A scientific perspective*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87163>
- Gao, J. (Ed.). (2015). *Integrated GIS and remote sensing analysis for hydrology and water resources*. CRC Press.
- Liang, S., Greene, R. (2020). A high-resolution global runoff estimate based on GIS and an empirical runoff coefficient. *Hydrology Research*, **51**(6), 1238–1260. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.132>
- Lobodzinskiy, O., Vasylenko, Y., Koshkina, O., Nabyvanets, Y. (2023). Assessing the impact of climate change on discharge in the Horyn River basin by analyzing precipitation and temperature data. *Meteorology, Hydrology and Water Management*, **11**(1), 93–106. <https://doi.org/10.26491/mhwm/163286>
- Maidment, D. R. (Ed.). (2002). *Arc Hydro: GIS for water resources*. ESRI Press.
- Mészáros, J., Miklánek, P., Pekárová, P. (2019). Estimation of the t-year specific discharge using the regionalised skewness coefficient of the Log-Pearson Type III distribution. In *Proceedings of the XXVIII Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management* (pp. 73–85). Kyiv, Ukraine.
- Salih, A. A. M., Hamid, A. A. (2017). Hydrological studies in the White Nile State in Sudan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, **20**, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.004>
- Sauquet, E., Gottschalk, L., Leblois, E. (2000). Mapping average annual runoff: A hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme. *Hydrological Sciences Journal*, **45**: 6, 799–815. <https://doi.org/10.1080/02626660009492385>
- Sishah, S. (2021). Rainfall runoff estimation using GIS and SCS-CN method for awash river basin, Ethiopia. *International Journal of Hydrology*, **5**(1), 33–37. <https://doi.org/10.15406/ijh.2021.05.00263>
- Sokolchuk, K., Sokáč, M. (2022). Comparison of spatial interpolation methods of hydrological data on example of the Pripyat river basin (within Ukraine). *Acta Hydrologica Slovaca*, **23**(2), 226–233. <https://doi.org/10.31577/ahs-2022-0023.02.0025>
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, **5**(1), 81–100. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>
- Vojtek, M., Vojteková, J. (2016). GIS-based approach to estimate surface runoff in small catchments: A case study. *Quaestiones Geographicae*, **35**(3), 97–116. <https://doi.org/10.1515/quageo-2016-0026>
- Wu, X., Wang, Zh., Liu, Ch., Liu, X. (2002). Digital Rainfall-Runoff model based on DEM: the application to Xiaolangdi-Huayankou section of the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, **6** (57), 671–678. <https://doi.org/10.11821/xb200206006>
- Zhan, X., Huang, M.-L. (2004). ArcCN-Runoff: An ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environmental Modelling and Software*, **19**(10), 875–879. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.03.001>
- Zhu, A.X., Band, L.E., McDonald, C. (1997). Modeling runoff processes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, **11**(5), 461–475. <https://doi.org/10.1080/02693799708902076>

## REFERENCES

- Arhipova, L.M. (2011). *Natural-technogenic safety of hydroecosystems: Monograph*. Ivano-Frankivsk.
- Afteniuk, O.O., Gorbachova, L.O. (2024). Spatial distribution of the calculation characteristics of the main phases of the ice regime in the Prypiat river basin within Ukraine with the using GIS. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, **1**(71), 30–40. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.1.3>
- Burlutska, M.E., Romanchuk, M.E., Pogorelova, M.P. (2020). Annual runoff rate in the Priazovya river basin. *Ecological sciences*, **6**(33), 16–22. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.6-33.2>
- Velychko, S., Dupliak, O. (2024). The use of the QGIS tools to determine hydrological characteristics. The experience in higher education. *Problems of water supply, sewerage, and hydraulics*, **47**, 4–11. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.47.4-11>
- Vikhrist, S., Mudra, K., Osiyskiy, E., Skobley, M., Yaroshevich, O. (2018). Methodical recommendations for the determination of the main anthropogenic pressures and their effects on surface water conditions. <https://www.davr.gov.ua/fls18/mvod1.pdf>
- Vyshnevskiy, V.I. (2000). *Rivers and reservoirs of Ukraine. Condition and use*. Kyiv: Firm "VIPOL".
- Hopchenko, Ye.D., Loboda, N.S. (2001). Estimation of Ukraine's natural water resources by the method of water-heat balance. *Scientific Works of Ukrainian Research Hydrometeorological Institute*, **249**, 106–119.
- Gorbacheva L. O. (2017). Hydrological and genetic analysis of spatial-temporal regularities of water flow of rivers of Ukraine: methodology, trends, forecast: the dissertation author's abstract ... Doctor of Geographical Sciences: 11.00.07. Kyiv National Taras Shevchenko University, Kyiv.
- Hrebin, V.V. (2010). *Modern water regime of the rivers of Ukraine (landscape-hydrological analysis)*. Kyiv: Nika-Tsentr.
- State Committee of the USSR for Construction Affairs. (1983). *Determination of design hydrological characteristics (SNIIP 2.01.14-83)*. Moscow.
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council "Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy". (2000). [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_962#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text)
- Kocherin, D.I. (1927). Average annual and monthly runoff in the European part of the Union. *Proceedings of the Moscow institute of transport engineers*, **6**, 10–26.
- Koshkina, O.V., Hlotka, D.V. (2013). Spatial distribution of the spring flood hydrometeorological characteristics in the Desna River basin using GIS. *Proceedings of the Ukrainian Hydrometeorological Research Institute*, **264**, 64–71.
- Lukyanets, O.I., Obodovskyi, O.H., Hrebin, V.V., Pochaijets, O.O., Kornienko, V.O. (2021). Spatial regularities of change in average annual water flow of rivers of Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*, **1**(113), 6–14. <https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.006>
- Obodovskyi, O.G., Lukianets, O.I., Konovalenko, O.S., Kornienko, V.O. (2016). Average annual water flow of rivers of the Ukrainian Carpathians and peculiarities of its territorial division. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, **4**(43), 25–32.
- Ostroukh, O.A. (2016). The regularities of the changes in the chemical composition of groundwater aquifers of the Chop-Mu-

- kachivskiyi basin. Abstract of the PhD dissertation: 04.00.06. Kharkiv National University n.a. V.N. Karazin, Kharkiv.
- Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On Approval of the Procedure for developing a river basin management plan" (2017). Retrieved January 21, 2026, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/336-2017-%D0%BF#Text>
- Pochaievets, O., Obodovskiy, O. (2019) Use of GIS for spatial distribution of low flow water runoff of Tisza River basins within Ukraine. *Physical Geography and Geomorphology*, **3**(95), 18–25. <https://doi.org/10.17721/phgg.2019.3.02>
- Protsyk, M., Chetverikov, B., Dorozhynskyy, O., Ivanevych, A. (2021). Methods of automated allocation of catchment basins according to digital elevation models (on the example of Skoliv district of Lviv region). *Geodesy, cartography and aerial photography*, **93**, 72–84. <https://doi.org/10.23939/istcgcap.2021.93.072>
- Rudenko, L.H. (Ed.). (2007). Surface waters and water resources (Maps 4–6, Section 8). *National Atlas of Ukraine*. Kyiv: State Scientific and Production Enterprise "Kartographia".
- Shakirzanova, Zh.R., Boyko, V.M., Goptsiy, M.V., Todorova, E.I., Dokus, A.A., Serbova, Z.F., Shvets, N.N. (2018). Method of forecasting assessment of the maximum runoff characteristics of the Dnipro basin's rivers in spring season. *Ukrainian hydrometeorological journal*, **22**, 80–99.
- ArcGIS 9. GeostatisticalAnalyst: User guide. (2001). Redlands (CA): ESRI Press.
- Beck, H. E. (2016). A global map of mean annual runoff based on discharge observations from large catchments (Technical report). <https://doi.org/10.5281/zenodo.44782>
- Bellamy, P. W., Cho, H. J. (2019). A GIS-based approach for determining potential runoff coefficient and runoff depth for the Indian River Lagoon, Florida, USA. In Lagoon environments around the world: A scientific perspective. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87163>
- Gao, J. (Ed.). (2015). Integrated GIS and remote sensing analysis for hydrology and water resources. CRC Press.
- Liang, S., Greene, R. (2020). A high-resolution global runoff estimate based on GIS and an empirical runoff coefficient. *Hydrology Research*, **51**(6), 1238–1260. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.132>
- Lobodzinskiy, O., Vasylenko, Y., Koshkina, O., Nabyvanets, Y. (2023). Assessing the impact of climate change on discharge in the Horyn River basin by analyzing precipitation and temperature data. *Meteorology, Hydrology and Water Management*, **11**(1), 93–106. <https://doi.org/10.26491/mhwm/163286>
- Maidment, D. R. (Ed.). (2002). Arc Hydro: GIS for water resources. ESRI Press.
- Mészáros, J., Miklánek, P., Pekárová, P. (2019). Estimation of the t-year specific discharge using the regionalised skewness coefficient of the Log-Pearson Type III distribution. In Proceedings of the XXVIII Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management (pp. 73–85). Kyiv, Ukraine.
- Salih, A. A. M., Hamid, A. A. (2017). Hydrological studies in the White Nile State in Sudan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, **20**, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.004>
- Sauquet, E., Gottschalk, L., Leblois, E. (2000). Mapping average annual runoff: A hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme. *Hydrological Sciences Journal*, **45**: 6, 799–815. <https://doi.org/10.1080/02626660009492385>
- Sishah, S. (2021). Rainfall runoff estimation using GIS and SCS-CN method for awash river basin, Ethiopia. *International Journal of Hydrology*, **5**(1), 33–37. <https://doi.org/10.15406/ijh.2021.05.00263>
- Sokolchuk, K., Sokáč, M. (2022). Comparison of spatial interpolation methods of hydrological data on example of the Pripjat river basin (within Ukraine). *Acta Hydrologica Slovaca*, **23**(2), 226–233. <https://doi.org/10.31577/ahs-2022-0023.02.0025>
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, **5**(1), 81–100. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>
- Vojtek, M., Vojteková, J. (2016). GIS-based approach to estimate surface runoff in small catchments: A case study. *Quaestiones Geographicae*, **35**(3), 97–116. <https://doi.org/10.1515/quageo-2016-0026>
- Wu, X., Wang, Zh., Liu, Ch., Liu, X. (2002). Digital Rainfall-Runoff model based on DEM: the application to Xiaolangdi-Huayuankou section of the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, **6** (57), 671–678. <https://doi.org/10.11821/xb200206006>
- Zhan, X., Huang, M.-L. (2004). ArcCN-Runoff: An ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environmental Modelling and Software*, **19**(10), 875–879. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.03.001>
- Zhu, A.X., Band, L.E., McDonald, C. (1997). Modeling runoff processes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, **11**(5), 461–475. <https://doi.org/10.1080/02693799708902076>

## MAPPING OF AVERAGE ANNUAL RIVER RUNOFF WITHIN THE RIVER BASIN DISTRICTS OF UKRAINE USING GIS TOOLS

**Olha Koshkina<sup>1</sup>**

ORCID: 0009-0006-6407-6145  
olga.koshkina@ukr.net

**Yevheniia Vasylenko<sup>1</sup>**

ORCID: 0009-0000-4681-6433  
evg.vasylenko29@gmail.com

**Vasyl Grebin<sup>1,2</sup>**

ORCID: 0000-0001-8197-607X  
grebin1964@gmail.com

**Tetiana Maslova<sup>1</sup>**

ORCID: 0000-0003-4058-9131  
tetjana\_maslova@ukr.net

<sup>1</sup> Ukrainian Hydrometeorological Institute,  
Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
Kyiv, Ukraine

Ukraine has adopted the principles of integrated water resources management based on the river basin approach, under which river basin districts serve as the fundamental units for water use regulation, protection, and restoration. Within this framework, the development of River Basin Management Plans (RBMPs) requires reliable hydrological characteristics of surface

water bodies. In particular, data on average annual water discharge with a 50% probability of exceedance are necessary for the analysis of key RBMP components, including the assessment of pressures, impacts, and water availability at the basin scale. However, the uneven distribution of hydrological monitoring stations limits the direct application of observational data in basin-scale analyses. This study presents a geographic information system (GIS)-based approach to mapping the spatial distribution of average annual water runoff modules with a 50% probability of exceedance across the territory of Ukraine. Using modern geoinformation technologies, a digital elevation model was generated, catchment areas of hydrological gauging stations were delineated, and their centre of the catchment were determined. Based on these inputs, an interpolation surface of average annual runoff modules was constructed, enabling the automated extraction of runoff characteristics at any point within the study area. A detailed analysis of spatial variability

in average annual runoff modules was performed for nine river basin districts of Ukraine. The identified spatial patterns reflect the influence of physical-geographical zonation and altitudinal differentiation, highlighting the controlling role of natural factors in runoff formation. The developed interpolation surface minimizes subjective influences inherent in traditional assessment approaches and provides an objective, reproducible tool for hydrological analysis. The results indicate that the generated interpolation surface can be effectively used in the preparation of River Basin Management Plans for all river basin districts of Ukraine, contributing to evidence-based water resources management at the national scale.

**Key words:** Average annual water runoff modules, interpolation surfaces, geographic information systems, river basins districts of Ukraine.



# ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

Редакція журналу **“МЕТЕОРОЛОГІЯ. ГІДРОЛОГІЯ. МОНИТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ”** приймає до розгляду оригінальні, раніше не опубліковані наукові статті з актуальних питань теоретичної та прикладної метеорології, кліматичних і гідрологічних досліджень, здійснення моніторингу вод та атмосферного повітря, а також матеріали окремих досліджень із суміжних тематик, пов'язаних з вирішенням важливих кліматичних, метеорологічних та гідрологічних проблем, питань моніторингу. Друкуються також короткі повідомлення, матеріали з'їздів і конференцій, рецензії на наукові монографії. Журнал друкує роботи в галузі “природничі науки” за спеціальністю “науки про Землю” (103).

Подані до редакції “Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля” рукописи проходять незалежне анонімне рецензування. Рукописи, що не відповідають профілю журналу, мають низький науково-теоретичний рівень або які не повною мірою відповідають правилам для авторів, можуть бути відхилені. Автори несуть повну відповідальність за точність викладених фактів, цитат, статистичних даних, бібліографічних довідок, написання географічних назв, власних імен. Для публікації в журналі приймаються рукописи українською або англійською мовами.

Публікація статей в журналі безоплатна. Статті подаються на сайт журналу <https://journal.uhmi.org.ua/> в електронній формі.

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РУКОПИСУ

Обсяг: оригінальних наукових статей — до 15 сторінок (разом з резюме, таблицями та ілюстративним матеріалом), методологічних, проблемних і оглядових — не більше 20 сторінок, коротких повідомлень, рецензій, матеріалів конференцій і з'їздів — 5 сторінок.

Рукопис готується у текстовому редакторі Microsoft Word, шрифт — 12, інтервал між рядками — 1.

## СТРУКТУРА СТАТТІ

### 1. ІНФОРМАЦІЙНА ЧАСТИНА.

1.1. Містить наступні позиції: індекс УДК (вирівнювання по лівому краю), прізвище, повністю ім'я та по-батькові автора (авторів) — напівжирним шрифтом, ORCID та E-mail кожного автора (авторів), назва установи, де працює автор(и), із зазначенням відомчої підпорядкованості (курсивом), адреси, телефону, — з вирівнюванням по правому краю. Якщо стаття має кілька авторів, то ім'я автора для листування позначається зірочкою.

### 1.2. НАЗВА СТАТТІ НАВОДИТЬСЯ ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ.

1.3. У Резюме (Анотації) викладають положення відповідно до структури статті (мета, методи дослідження, результати, новизна), обсяг резюме українською мовою, якщо стаття україномовна, — від 800 до 1800 знаків, англійською — не менше 1800 знаків з пробілами, якщо стаття англійською мовою, анотація повинна містити не менше 1800 знаків (з пробілами).

### 1.3. Ключові слова (не більше 5–6).

1.4. У статтях, підготовлених українською мовою, імена авторів (без по батькові), назва установи, назва статті, резюме та ключові слова додатково наводяться англійською мовою.

## 2. ТЕКСТОВА ЧАСТИНА РУКОПИСУ.

### 2.1. Текст статті має містити наступні рубрики:

- Вступ (Детальна оцінка актуальних досліджень і публікацій, які містили проміжні результати або варіанти розв'язання даної проблеми/тематки. Виділення аспектів, які досі залишаються не вирішеними. Мета даної публікації, яку не слід плутати з метою тематичних або дисертаційних досліджень в цілому).
- Матеріали і методи (для оригінальних статей).
- Результати та їх обговорення.
- Висновки (підсумок результатів у відповідності з метою роботи).

2.2. Таблиці, картографічний та ілюстративний матеріал нумеруються, на них робляться посилання в тексті. Кількість ілюстрацій залежно від обсягу статті не має перевищувати 10. Таблиці із заголовком і порядковим номером, розміщують одразу після посилання на них (після закінчення абзацу). Слід запобігати громіздким таблиць та таблиць, заповнених лише первинними даними.

Географічні карти і картосхеми не мають бути перенасиченими написами, перетинання назв і цифр неприпустиме. Підписи на картах повинні добре читатись; слід зазначити масштаб та наводити умовні позначення.

Вся графіка має бути комп'ютерною, виконаною в одному з форматів: TIFF, BMP, JPEG з роздільністю не менш 350 dpi.

Рисунки, графіки, схеми та ін. додатково подаються окремими файлами.

### 3. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ.

3.1. Бібліографічні описи у списку бібліографічних посилань наводять за бібліографічним стилем цитування APA stylereferences. <https://apastyle.apa.org>

3.2. ДЖЕРЕЛА У СПИСКУ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ НЕ НУМЕРУЮТЬ І ПОДАЮТЬ ЗА АБЕТКОЮ з абзацом (відступом від лівого краю) 0,5 см.

3.3. До списку не включаються видання, опубліковані в російській федерації та білорусі після 2014 року.

3.4. Для статей УКРАЇНСЬКОЮ мовою наводять ДВА списки використаних джерел: список використаних джерел мовою оригіналу (бібліографічні описи подають

за бібліографічним стилем цитування APA stylereference) та References — у перекладі англійською.

3.5. Для статей АНГЛІЙСЬКОЮ мовою подають ОДИН список використаних джерел — References, у якому бібліографічний опис джерел не романським шрифтом, а, наприклад, кириличним, арабським, китайським тощо, наводять у перекладі англійською мовою, зазначають наприкінці бібліографічного опису у квадратних дужках англійською мовою мову джерела — [in Ukrainian], тощо.

3.6. Формат посилання на джерела в тексті Внутрішньотекстові посилання подають у круглих дужках із зазначенням:

- прізвища автора (якщо автор один) або перших слів назви праці (для видань без авторів), через кому року публікації і, за необхідності, через кому сторінок після скорочення "с." (укр. мовою) або "р." (англ. мовою). Назву праці можна скорочувати, а пропущені слова позначити знаком "три крапки": (Surname, 2023), (Surname, 2023, p. 123), (Surname, 2023, pp. 12–34), (Titleofthebook . . . , 2023, p. 123), (Titleofthe . . . , 2023);
- прізвища співавторів (якщо авторів не більше двох), року видання: (Surname 1 & Surname 2, 2023; Прізвище 1 та Прізвище 2, 2023);
- прізвища лише першого співавторів (якщо авторів понад двоє), скорочення "та ін." або "etal.", року видання: (Surname 1 et al., 2023; Прізвище 1 та ін., 2023);
- прізвища та ініціалів автора, року видання (якщо у статті є посилання на роботи авторів з однаковим прізвищем, опубліковані того самого року): (Surname, N., 2023);
- прізвища автора, року видання першої роботи, року видання наступної роботи (якщо стаття містить посилання на роботи одного автора, опубліковані в різні роки прізвище автора не дублюють): (Surname, 2022, 2023);
- прізвища автора, року видання, малої латинської літери після року видання (якщо стаття містить посилання на роботи одного автора, опубліковані того самого року): (Surname, 2023a, 2023b, 2023c).

## ПРИКЛАДИ ОФОРМЛЕННЯ БІБЛІОГРАФІЧНИХ ОПИСІВ (за APA stylereferences)

### Книжкове видання:

Осадчий, В.І., Бабченко, В.М., Набиванець, Ю.Б., Скринник, О.Я. (2013). Динаміка температури повітря в Україні за період інструментальних метеорологічних спостережень. Київ: Ніка-Центр.

Kamzist, Zh.S., Shevchenko, O.I. (2008). Hydrogeology of Ukraine. Kyiv: Firmalnok. [in Ukrainian].

### Для електронних книг або книг, які мають електронні версії, наприкінці бібліографічного опису зазначають URL.

Kennett, B.L.N. (Compiler and Editor). (1991). "IASPEI 1991 Seismological Tables". Bibliotech, Canberra, Australia. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00863.x>.

### Стаття в журналі:

Самойлік, М.С., Молчанова, А.В. (2017). Екологічні аспекти впливу полігонів твердих побутових відходів на навколишнє середовище. Вісник Полтавської державної аграрної академії, 1–2, 88–91. <http://journals.pdaa.edu.ua/visnyk/article/view/86/120>.

Fraser, C.M., Kukuric, N., Dmitrieva, T., Dumont, A. (2023). Transboundary water cooperation under SDG indicator 6.5.2: disaggregating data top rovide additional insight sat the aquifer level. WaterPolicy, 25 (11), 1015–1034. <https://doi.org/10.2166/wp.2023.026>.

### Матеріали конференції, опубліковані у збірнику матеріалів конференції:

Pigulevskiy, P.I., Shumlianska, L.A., Dubovenko, Yu.I., Svystun, V.K. (2019). The mantle disruptions by P-waves velocity gradients analysis under East of Ukrainian Shield. 18<sup>th</sup> Int. Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. (13–16 May 2019, Kyiv, Ukraine). (pp. 688–693). Отримано із <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=98574>. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902151>.

### Нормативно-правові акти, стандарти:

Розпорядження Кабінету Міністрів України про передачу цілісних майнових комплексів державних підприємств, установ та організацій до сфери управління Державної служби геології та надр. (2011). Отримано 16 жовтня 2022 із <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/8102011%D1%80?test=XNLMF5x.qwJgbGwZio6d/tNH14Bgs80msh8le6>

### Автореферати дисертацій:

Дятел, О.О. (2019). Формування водообміну та його прогнозування в умовах техногенезу на меліорованих територіях Волинського Полісся. Автореф. дис. . . канд. тех. наук: 06.01.02. Інститут водних проблем і меліорації НААН України, Київ.

### Для кожного джерела потрібно зазначити DOI (за наявності).

Детальні вимоги та приклади оформлення бібліографічних описів можна також подивитися у: Publication Manual of the American Psychological Association (APA), 7<sup>th</sup> Edition та у Прикладах оформлення посилань за APA (7<sup>th</sup> ed.) у списку використаних джерел. <https://apastyle.apa.org/products/publication-manual-7th-edition>.