

ISSN 2311-0902 (print)  
ISSN 2616-7271 (online)

**Номер 27**  
*Issue 27*

**2021**

# УКРАЇНСЬКИЙ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ

*Ukrainian Hydrometeorological Journal*

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

*Ministry of Education and Science of Ukraine*

**ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

*Odessa State Environmental University*

**У К Р А Ї Н С Ь К И Й  
Г І Д Р О М Е Т Е О Р О Л О Г І Ч Н И Й  
Ж У Р Н А Л**

*Ukrains'kij Gidrometeorologičnij Žurnal*

*Ukrainian Hydrometeorological journal*

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

*Scientific Journal*

Друкується 2 рази на рік

*Issued: 2 times a year*

**Заснований у 2005 р.**

*Founded in 2005 y.*

**№ 27, 2021**

Одеса

Одеський державний екологічний університет

2021

**Головний редактор**

**Ю. С. Тучковенко**, д-р геогр. наук, проф.,  
проректор з наукової роботи ОДЕКУ (Одеський  
державний екологічний університет)

**Заступники головного редактора**

**Н. С. Лобода**, д-р геогр. наук, проф., зав. кафедри  
гідроекології та водних ресурсів ОДЕКУ;  
редактор розділу : Гідрологія суші,  
водні ресурси, гідрохімія

**Т. А. Сафранов**, д-р геол.-мінер. наук, проф.,  
зав. кафедри екології та охорони довкілля ОДЕКУ;  
редактор розділів : Конструктивна географія і  
раціональне використання природних ресурсів,  
Екологічні аспекти природокористування

**В. М. Хохлов**, д-р геогр. наук, проф.,  
проректор з навчально-методичної роботи ОДЕКУ;  
редактор розділів : Метеорологія  
і кліматологія, Агрометеорологія

**Члени редакційної колегії**

**А. А. Бакланов**, д-р фіз.-мат. наук, проф. метеорології, геофізики,  
ст. наук. співроб. Датського метеорологічного інституту; асоційований  
проф. Інституту Нільса Бора Копенгагенського університету (Данія);  
**М. А. Берлінський**, д-р геогр. наук, проф., зав. кафедри океанології та  
морського природокористування ОДЕКУ; **В. В. Гребін**, д-р геогр.  
наук, проф. кафедри гідрології та гідроекології Київського  
національного університету ім. Тараса Шевченка; **М. І. Кульбіда**, канд.  
геогр. наук, директор Українського гідрометеорологічного центру,  
м. Київ; **Д. В. Лукашов**, д-р біол. наук, проф. кафедри екології та  
охорони навколишнього середовища, зав. кафедри екології та зоології  
Київського національного університету ім. Тараса Шевченка;  
**О. Макарінський**, PhD в географії, пров. наук. співроб.,  
Австралійський інститут морських наук, дослідницький центр  
"Арафура-Тимор" (Австралія); **Д. Макарінська**, PhD у геофізиці,  
Служба якості води/Відділ водних ресурсів, Департамент екології та  
природних ресурсів (Австралія); **О. В. Мудрак**, д-р с.-г. наук, проф.,  
зав. кафедри екології, природничих та математичних наук КЗВО  
"Вінницька академія безперервної освіти"; **В. А. Овчарук**, д-р геогр.  
наук, доцент, директор Гідрометеорологічного інституту ОДЕКУ;  
**А. М. Польовий**, д-р геогр. наук, проф., зав. кафедри агрометеорології  
та агроєкології ОДЕКУ; **С. М. Степаненко**, д-р фіз.-мат. наук, проф.,  
ректор ОДЕКУ; **М. М. Федоряк**, д-р біол. наук, проф. та зав. кафедри  
екології та біомоніторингу Чернівецького національного університету  
ім. Юрія Федьковича; **А. В. Чугай**, д-р техн. наук, декан  
природоохоронного факультету ОДЕКУ; **Ж. Р. Шакірманова**, д-р  
геогр. наук, проф., зав. кафедри гідрології суші ОДЕКУ.

**Редактор англomовних текстів**

**А. В. Іванченко**, канд. філол. наук, доц. каф. іноземних мов ОДЕКУ.

**Відповідальний секретар**

**О. І. Маруніч**, співробітник редакційно-видавничого відділу ОДЕКУ.

"Український гідрометеорологічний журнал" є спеціалізованим науковим виданням, в якому публікуються результати фундаментальних та прикладних наукових досліджень у напрямках "Гідрометеорологія" (метеорологія і кліматологія; агрометеорологія; гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія; океанологія), "Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів" спеціальності «Науки про Землю» та «Екологічні аспекти природокористування» спеціальності «Екологія» з метою інформування про сучасні наукові досягнення українських та зарубіжних дослідників, розвитку вищої освіти, оприлюднення результатів наукових досліджень з теоретичних та прикладних аспектів вирішення актуальних проблем у відповідних або суміжних областях науки. Журнал призначений для науковців, науково-педагогічних працівників закладів вищої освіти, студентів, аспірантів та докторантів, фахівців у галузі природничих наук за спеціальностями «Науки про Землю» та «Екологія».

**Ukrainian Hydrometeorological Journal** is a specialized scientific periodical that publishes the original results of fundamental and applied research in the following fields: 'Hydrometeorology' (Meteorology and Climatology; Agricultural Meteorology; Hydrology, Water Resources, Hydrochemistry; Oceanography), 'Constructive Geography and Rational Use of Natural Resources' of the specialty 'Earth Sciences', and 'Environmental Aspects of Nature Management' of the specialty 'Ecology'. The objective of the Journal consists in presenting the information on modern scientific achievements of Ukrainian and foreign researchers, promoting the development of higher education, and publishing the original research works on theoretical and applied aspects of solving the topical problems in respective and closely-related areas of science.

The Journal is intended for use by scientists, academic staff of higher education institutions, students, postgraduate students, researchers and experts in the sphere of the Natural Sciences' specialties such as 'Earth Sciences' and 'Ecology'.

**Editor-in-Chief**

**Yurii S. Tuchkovenko**, D. Sc. in Geography, Prof.,  
Vice-Rector for Research of OSENU (Odessa State  
Environmental University), Ukraine

**Deputies of Editor-in-Chief**

**Valeriy M. Khokhlov**, D. Sc. in Geography, Prof.,  
Vice-Rector for Educational Methodology of OSENU, Ukraine;  
Editor of the sections : Meteorology and Climatology,  
Agricultural Meteorology

**Nataliya S. Loboda**, D. Sc. in Geography, Prof.,  
Head of the Department of Hydroecology  
and Water Resources of OSENU, Ukraine;  
Editor of the section : Hydrology,  
Water Resources, Hydrochemistry

**Tamerlan A. Safranov**, D. Sc. in Geology and Mineralogy,  
Prof., Head of the Department of Ecology and  
Environmental Protection of OSENU;  
Editor of the sections : Constructive Geography  
and Rational Use of Natural Resources,  
Environmental Aspects of Nature Management

**Members of the Editorial Board**

**Alexander A. Baklanov**, D. Sc. in Physics and Mathematics, Prof. of  
Meteorology, Geophysics, Senior Scientist / Project Leader at Danish  
Meteorological Institute, Research Department; Adjoint Professor at the Niels  
Bohr Institute of the University of Copenhagen, Denmark;  
**Mykola A. Berlinskyi**, D. Sc. in Geography, Prof., Head of the Department  
of Oceanography and Marine Nature Management of OSENU, Ukraine;  
**Angelina V. Chugai**, D.Sc. in Technology, Dean of Nature Protection  
Faculty of OSENU, Ukraine; **Mariia M. Fedoriak**, D.Sc. in Biology, Prof.  
and Head of the Department of Ecology and Biomonitoring of Yuriy  
Fedkovych Chernivtsi National University, Ukraine; **Vasyl V. Grebin**,  
D. Sc. in Geography, Prof. of the Department of Hydrology and  
Hydroecology of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine;  
**Mykola I. Kulbida**, PhD in Geography, Director of Ukrainian  
Hydrometeorological Centre, Kyiv, Ukraine; **Dmitriy V. Lukashov**, D.Sc.  
in Biology, Prof. of the Department of Ecology and Environmental  
Protection, Head of the Department of Ecology and Zoology of Taras  
Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine; **Oleg Makarynskyi**,  
PhD in Geography, Lead Researcher, Australian Institute of Marine Science,  
Arafura Timor Research Facility, Australia; **Dina Makarynska**, PhD in  
Geophysics, Aquatic Health Unit / Water Resources Division, Department of  
Environment and Natural Resources, Australia; **Oleksandr V. Mudrak**,  
D. Sc. in Agriculture, Prof., Head of the Department of Ecology, Nature and  
Mathematic Sciences of Vinnytsia Academy of Continuing Education,  
Ukraine; **Valeriya A. Ovcharuk**, D. Sc. in Geography, Assoc. Prof.,  
Director of the Hydrometeorological Institute of OSENU, Ukraine;  
**Anatolii M. Polovyi**, D. Sc. in Geography, Prof., Head of the Department of  
Agrometeorology and Agroecology of OSENU, Ukraine; **Zhanetta R.**  
**Shakhirzanova**, D. Sc. in Geography, Prof., Head of the Department of Land  
Hydrology of OSENU, Ukraine; **Sergiy M. Stepanenko**, D. Sc. in Physics  
and Mathematics, Prof., Rector of OSENU, Ukraine.

**Editor of texts in English**

**Andrii Ivanchenko**, PhD in Philology, Assoc. Prof. of the Department of Foreign  
Languages, OSENU, Ukraine

**Executive Secretary**

**Oleksandra I. Marunych**, Officer of the Editorial and Publishing Department of  
OSENU, Ukraine.

**ЗМІСТ**

**CONTENTS**

**Метеорологія і кліматологія**

**Meteorology and Climatology**

Гончарова Л. Д., Прокоф'єв О. М., Решетченко С. І., Черниченко А. В. Вплив атмосферних макропроцесів на просторовий розподіл опадів по території України у весняний сезон

Недострелова Л. В., Чумаченко В. В. Часовий розподіл гроз на АМСЦ Одеса на початку XXI століття

Руженцев М. В., Жила С. С., Павліков В. В., Косарський В. В., Черепнін Г. С. Бюджетний вимірювач інтегральних параметрів вологи в стовпі атмосфери

El Hadri Y., Slizhe M., Sernytska K. Wind potential assessment over Morocco's Marrakesh - Safi region in 2021-2050 based on the RCM's forecasts as part of the CORDEX-Africa project

**Гідрологія суші,  
водні ресурси, гідрохімія**

**Hydrology, Water Resources,  
Hydrochemistry**

Горбачова Л. О., Приходькіна В. С., Христюк Б. Ф., Заболотня Т. О., Розлач В. О. Статистичний аналіз максимального стоку води річки Південний Буг за методом «Indicators of Hydrologic Alteration»

Мельник С. В., Лобода Н. С. Оцінка змін характеристик стоку лівобережних приток Верхнього Дністра в умовах потепління

**Екологічні аспекти  
природокористування**

**Environmental Aspects of  
Nature Management**

Жук А. В., Зароченцева О. Д. Особливості світлового забруднення навколишнього середовища Чернівецької області

5 Goncharova L. D., Prokofiev O. M., Reshetchenko S. I., Chernichenko A. V. Influence of atmospheric macroprocesses on the spatial distribution of spring precipitation within the territory of Ukraine

16 Nedostrelova L. V., Chumachenko V. V. Time distribution of thunderstorms observed at Odesa AMSC at the beginning of the 21st century

24 Ruzhentsev N. V., Zhyla S. S., Pavlikov V. V., Kosharsky V. V., Cherepnin G. S. Cost effective meter of moisture integral parameters of the atmospheric column

34 El Hadri Y., Slizhe M., Sernytska K. Wind potential assessment over Morocco's Marrakesh - Safi region in 2021-2050 based on the RCM's forecasts as part of the CORDEX-Africa project

42 Gorbachova L. O., Prykhodkina V. S., Khryustiuk B. F., Zabolotnia T. O., Rozlach V. O. Statistical analysis of maximum runoff of the Southern Buh River using the method of "Indicators of Hydrologic Alteration"

55 Melnyk S. V., Loboda N. S. Assessment of runoff characteristics changes of the left bank tributaries of the Upper Dniester under warming conditions

66 Zhuk A. V., Zarochentseva O. D. Peculiarities of the environmental light pollution in Chernivtsi Region

- Лукашов Д. В., Хохлова Л. К. Оцінка седиментаційної ролі популяції молюсків роду *Dreissena* у контролі якості води Каховського магістрального каналу (Херсонська область)
- 76 *Lukashov D. V., Khokhlova L. K.* Evaluation of sedimentation role of *Dreissena* molluscs' population in the process of water quality control in Kakhovka Main Channel (Kherson Region)
- Сафранов Т. А., Шаніна Т. П., Приходько В. Ю. Передумови формування і реалізації регіонального плану управління твердими муніципальними відходами в Одеській області
- 86 *Safranov T. A., Shanina T. P., Prykhodko V. Yu.* Prerequisites for formation and implementation of a municipal solid waste management plan in Odesa Region
- Тесьолкіна Т. С., Лукашов Д. В. Роль зелених насаджень в міграції та фіксації важких металів (на прикладі національного природного парку «Голосіївський», м. Київ)
- 97 *Tesolkina T. S., Lukashov D. V.* Role of green spaces for migration and setting of heavy metals (as illustrated by Holosiivskiyi National Nature Park, Kyiv)
- Юрасов С. М., Караулов В. Д., Перченко М. Г., Юдина Е. О., Грабко Н. В. Іригаційні властивості вод Кучурганського і Барабойського водосховищ
- 106 *Yurasov S. M., Karaulov V. D., Perchenko M.H., Yudyna E.O., Hrabko N. V.* Irrigation properties of Kuchurgan and Baraboi Water Reservoirs

УДК 551.577

## ВПЛИВ АТМОСФЕРНИХ МАКРОПРОЦЕСІВ НА ПРОСТОРОВИЙ РОЗПОДІЛ ОПАДІВ ПО ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ У ВЕСНЯНИЙ СЕЗОН

Л. Д. Гончарова<sup>1</sup>, О. М. Прокоф'єв<sup>1</sup>, С. І. Решетченко<sup>2</sup>, А. В. Черниченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [goncharova.luda.50@gmail.com](mailto:goncharova.luda.50@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-6340-2424>

<sup>2</sup> Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, 61022, Харків

У статті наведені результати комплексного статистичного дослідження просторового розподілу опадів весняного сезону на території України та його зв'язок з основними низькочастотними коливаннями Північної півкулі. Предметом дослідження є місячна кількість опадів за березень, квітень, травень на 40 довгорядних станціях України, рівномірно розташованих по її території, та індекси Північно-Атлантичного (ПАК) і Північноморського-Каспійського (ПМКК) коливань за 45-річний період (1962-2006 рр.). Використання багаторічних даних дозволило здійснити об'єктивну кластеризацію і провести розбиття території України на регіони з різними характерними типами погоди при випадінні атмосферних опадів, кожний з яких є фізично обґрунтованим. Для наочності в статті наведені регіональні статистичні моделі у вигляді карт-схем вірогідних зв'язків між розподілом атмосферних опадів по території України у весняний сезон та північно-атлантичними і європейсько-середземноморськими макропроцесами. Для прогнозування місячної кількості опадів у березні доцільно враховувати стан Північно-Атлантичного коливання. Відгук цього коливання виявили на територіях Чернівецької, Вінницької, Черкаської, Київської, північної частини Одеської, західних районів Чернігівської та південної частини Житомирської областей. В західних районах України, а також в Вінницькій, Київській, Житомирській та Чернігівській областях формування атмосферних опадів у квітні залежить від стану як ПАК, так і ПМКК; на решті території України – лише від ПМКК. Не вдалося з імовірністю 90% виявити лінійний статистичний зв'язок між опадами у травні та основними кліматичними сигналами Північної півкулі, що розглядалися, тільки для деяких північних областей України, а саме: Київської, Чернігівської, Сумської та центральних (Полтавська та північ Черкаської) регіонів України. Дослідження впливу північно-атлантичних та європейсько-середземноморських макропроцесів на розподіл місячної кількості опадів по території України, яке проведено з застосуванням статистичного підходу, свідчить про його неоднозначність в різні місяці весняного сезону і в різних областях України, що потребує подальших досліджень при вирішенні загальної наукової проблеми – дослідження кліматозумовлених природних ресурсів для забезпечення сталого соціально-економічного розвитку України в умовах змін глобального клімату.

**Ключові слова:** клімат; кластерий аналіз; коефіцієнт кореляції; далекодючі низькочастотні коливання; атмосферна циркуляція.

### 1. ВСТУП

Вивчення сучасного клімату нашої планети та його мінливості набули за останні роки чітко визначеної практичної значущості. На думку українських кліматологів [1-4] внаслідок глобального потепління кліматичні умови України стануть різко змінюватися і тому кожне нове дослідження в цьому напрямі дасть можливість поліпшити моделі очікуваних проєкцій регіональних кліматичних змін у XXI столітті. Зараз вже досягнуті достатньо великі успіхи в зборі, систематизації та узагальненні емпіричної інформації, яка характеризує клімат різного просторо-

вого та часового масштабу. Але розосередженість вихідної інформації ускладнює вивчення структури та мінливості сучасного клімату і потребує статистичного підходу, за допомогою якого можна використати для дослідження багаторічний архів даних, а це є серйозним резервом покращення якості довгострокових прогнозів погоди.

Кліматичний режим кожного регіону формується як синтез особливостей температури, вологості, опадів, вітру, які базуються на закономірностях розподілу радіаційного, теплого та водного балансів і впливу атмосферної циркуляції. Взаємодія цих чинників, їх інтенсивність і

особливості впливу характеризуються певною територіальною індивідуальністю. В свою чергу, кожен з перелічених чинників формується під дією елементів, яким також властиві свої індивідуальні географічні ознаки. І якщо в питанні змін температури повітря вчені досягли єдиної думки, то відносно змін кількості опадів, як одного з показників режиму зволоження території, однозначної точки зору поки не існує. Але опади – частина кліматичних ресурсів, що найістотніше (поряд з температурою повітря) впливає на соціально-економічний розвиток будь-якої країни. Специфічність властивостей атмосферних опадів (різко виражена просторова та часова неоднорідність) утворює великі складнощі по їх вивченню. Крім того, недооцінка деяких аспектів структури атмосферних опадів призвела до того, що вони на сьогодні досліджені все ще недостатньо [5].

Актуальність обраної теми полягає в необхідності визначення стану одного з основних клімато-зумовлених природних ресурсів для раціонального природокористування, вирішення природно-екологічних проблем, перспективного планування та адаптації різних галузей економіки України до умов глобальних змін клімату.

Дослідження виконано відповідно до цілей, сформованих в науково-дослідній роботі кафедри метеорології та кліматології Одеського державного екологічного університету з теми: «Режим опадів по регіонах України наприкінці ХХ та на початку ХХІ століть» (№ ДР 0111U000590).

Метою даної роботи є реалізація комплексного статистичного підходу до визначення особливостей розподілення атмосферних опадів весняного сезону на території України та дослідження впливу на цей розподіл Північно-Атлантичного і Північноморського-Каспійського коливальних.

Враховуючи практичну значущість прогнозування атмосферних опадів, відповідно до поставленої мети, розв'язано такі задачі. Проведена об'єктивна кластеризація території України за місячною кількістю опадів весняного сезону та сформовані узагальнені кластери, які представлені часовими рядами середніх векторів визначених кластерів. Побудовані карти-схеми впливів північно-атлантичних та європейсько-середземноморських макропроцесів на формування весняних опадів по території України.

Предметом дослідження є місячна кількість опадів у березні, квітні та травні на 40 довготривалих станціях України, рівномірно розташованих по її території, за 45-річний період (1962-2006 рр.); індекси Північно-Атлантичного (ПАК)

і Північноморського-Каспійського (ПМКК) коливальних за аналогічний період.

Об'єктом дослідження є визначення ролі внутрішніх кліматоутворювальних факторів, які формують особливості просторово-часового розподілу атмосферних опадів весняного сезону на території України в умовах змін і коливальних глобального клімату.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* За останні десятиріччя ХХ і на початку ХХІ століть (в зв'язку зі змінами глобального клімату) виникла необхідність у більш широкому дослідженні внутрішніх кліматоутворювальних факторів і розвитку можливостей з попередження кліматичних змін на регіональному масштабі. Багато з зареєстрованих змін кліматичної системи є нетиповими або безпрецедентними. Такі прояви не лише становлять загрозу для життя та здоров'я людей, а й зумовлюють значні та незворотні зміни в екосистемах багатьох країн світу. Вони мають переважно небезпечний та стихійний характер і будуть посилюватись у майбутньому [4, 6, 7].

За своїм географічним положенням та станом довкілля, Україна є однією з країн, для яких соціально-економічні наслідки зміни клімату можуть бути незворотними [1, 6, 7].

Як показують О.М. Нажмудінова та Н.С. Єрмоленко [8], для всієї території України характерною особливістю першого десятиріччя ХХІ століття є збільшення кількості тепла та деформація поля сум активних температур з зонального напрямку у меридіональний, за винятком півдня країни. За останні 20 років по країні середня температура влітку зросла на 1,3...1,7 °С, а зимку – на 2,0...2,5 °С. При подальшому розвитку глобального потепління ХХІ ст. підвищення температури на території України очікується у всі місяці і сезони року. Основна причина потепління вбачається у підсиленні природного парникового ефекту в атмосфері парниковими газами. Водночас відзначається зменшення опадів як за величиною, так і за амплітудою коливальних з року в рік. Проте, в межах місяця мінливість опадів залишилася значною при високій ймовірності випадання сильних дощів за окрему добу. Зростання півдобових сум опадів, особливо у західних і південних областях, істотно посилилось, констатується збільшення повторюваності стихійних конвективних явищ (зливи, шквали, град тощо). Під впливом найбільш високих температур опинились північні та північно-східні регіони країни. Локалізація максимальних значень додатної аномалії температури повітря в зоні Лісостепу та Полісся (до 9-11°С) є нетиповим

явищем, оскільки максимальні температури повітря, а отже, і найвищі додатні аномалії, за середньокліматичними показниками, належать Степу [8].

У роботах Хохлова В. М. та ін. [9, 10] розглядаються просторово-часові кількісні показники, які характеризують погодні умови стосовно добової температури та опадів – індекси тепла, холоду та опадів. Виявлено, що в умовах змін клімату збільшилась повторюваність надзвичайно теплих днів та зменшилась кількість днів з екстремально низькою температурою. За допомогою аналізу гістограм та вейвлет-аналізу показано, що можливою причиною таких змін може бути вплив на погодні умови України Північно-Атлантичного коливання.

З дев'яностих років минулого століття значно збільшилась кількість небезпечних явищ погоди в багатьох регіонах Земної кулі, в тому числі і в Україні. Смерчі, шквали, сильні зливи, як правило, пов'язані з мезомасштабними процесами, для вивчення яких потрібна більш детальна інформація, ніж дані метеорологічних та аерологічних спостережень. Проте відомо, що локальні атмосферні процеси розвиваються на великомасштабному фоні, тому для виявлення умов розвитку небезпечних явищ погоди доцільно використовувати кількісні характеристики процесів синоптичного масштабу, зокрема, відносний вихор швидкості вітру, потенціальний вихор, різні види фронтального параметра, деякі критерії гідродинамічної нестійкості тощо [6, 11].

Шурдою К. Е. [12] оцінено сучасний стан та економічні наслідки зміни клімату, досліджено економічні аспекти стабілізації концентрації парникових газів в атмосфері на відносно безпечному рівні. Особливу увагу приділено наслідкам зміни клімату в Україні та аналізу ступеня схильності до цих змін різних галузей економіки. З кінця 1980-х років у світовій науковій спільноті підвищується стурбованість збільшенням швидкості змін, що відбуваються у кліматичній системі. В середині 1990-х років на глобальному рівні обговорюється, що зміни клімату відбуваються не без впливу антропогенних факторів, тобто необхідно скоротити тиск цивілізації на біосферу. В кінці 1990-х років науковці намагаються якомога точніше оцінити вплив кліматичних трансформацій на економіку. На початку нового століття у всьому світі підраховують збитки від стихійних лих. У середині першого десятиріччя встановлено, що 90% кліматичних змін обумовлені антропогенним фактором і лише 10% цих змін – природного походження [12].

У роботі [13] представлені результати аналізу

та оцінки режиму атмосферних опадів у зимовий сезон для території України в умовах глобальних змін клімату. Розглядається зв'язок просторово-часового розподілу цієї кліматичної характеристики з Північно-Атлантичним та Північно-морським-Каспійським коливаннями. Встановлено тісний лінійний кореляційний зв'язок між атмосферними опадами зимового сезону і основними телеконекціями Північної півкулі.

На основі взаємного спектрального аналізу Гончаровою Л.Д та Решетченко С.І. [14] виявлено зв'язок між Північно-Атлантичним коливанням та температурою повітря, опадами, приземним тиском на території лівобережної України у другій половині ХХ століття. Встановлено, що часова неоднорідність у змінах глобальної температури повітря залежить від атмосферної циркуляції. Для характеристики стану та інтенсивності атмосферної циркуляції в Північній Атлантиці використовують характеристики центрів дії атмосфери. Чисельні дослідження підтверджують думку про взаємозв'язок стану центрів дії атмосфери, інтенсивності атмосферної циркуляції та змін кліматичних характеристик в Атлантико-Європейському регіоні в ХХ столітті.

Сільське господарство є найбільш чутливою галуззю економіки до коливань та змін клімату. Враховуючи інерційний характер сільського господарства та залежність його ефективності від погодних умов, уже зараз виникає необхідність у прийнятті своєчасних рішень щодо складних проблем, зумовлених змінами клімату, з залученням результатів глобальних кліматичних моделей, які розраховують майбутні кліматичні режими на основі низки сценаріїв зміни антропогенних факторів. В останній час для нових кліматичних розрахунків використовується набір сценаріїв, а саме Репрезентативні траєкторії концентрацій (Representative Concentration Pathways – RCP). Це сценарії, які включають часові ряди викидів і концентрацій всього набору парникових газів, аерозолів і хімічно активних газів [7, 15].

Польовий А.М. та інші у роботах [1, 7, 15, 16] представляють показники радіаційно-теплогового режиму по природно-кліматичних зонах України за період 1986-2005 рр. у порівнянні з очікуваними їх змінами, розрахованими за двома сценаріями RCP4.5 та RCP8.5 на період 2015-2050 рр. Відзначається, що до 2050 р. буде спостерігатись підвищення в надходженні сонячної радіації за обома сценаріями, порівняно з середніми багаторічними значеннями. А це в свою чергу спричинить зростання температури повітря в усіх агрокліматичних зонах України. Зміни в темпе-



ратурному режимі призведуть до підвищення температури повітря в зимові місяці, що зменшить її амплітуду. Крім того, зростання ресурсів тепла зумовить краще теплозабезпечення сільськогосподарських культур.

Таким чином, як свідчать результати наведених досліджень, протягом останніх тридцяти років в Україні мали місце екстремальні прояви погодних умов, пов'язані, насамперед, з атмосферою циркуляцією. Для визначення природи метеорологічних явищ, розроблення вірогідних методів їх прогнозування та ефективних заходів запобігання значних економічних збитків, необхідне подальше всебічне їх дослідження, удосконалення і збільшення інформаційної бази з використанням сучасних методів статистичного аналізу та чисельного моделювання.

## 2. ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

У природничих науках широко використовуються математичний апарат теорії випадкових функцій та випадкових полів. Такий підхід дозволяє відмовитися від розгляду особливостей окремих миттєвих значень випадкових процесів, залежність яких від просторових координат, а також їх часовий хід носять доволі складний характер, а розглядати реалізацію, яка відповідає фіксованим зовнішнім умовам. При цьому мається на увазі, що статистичне осереднення проводиться по всьому набору можливих реалізацій поля. У сучасних умовах практичною основою вивчення клімату того чи іншого регіону та його динаміки є база емпіричних даних, яка містить не тільки ряди спостережень, але й вибір статистик та методів, за допомогою яких визначається просторово-часові масштаби метеорологічних полів, їх структура та мінливість. Статистики, що отримані в результаті застосування методів багатовимірної аналізу, набувають зараз широкого використання в кліматичному моделюванні, при плануванні та оптимізації мережі станцій, на яких виконуються спостереження, в прогностичній діяльності, розв'язанні задач моніторингу клімату і т.п. [17-22].

Оскільки атмосферна циркуляція є головним проявом зміни клімату, тому що охоплює всі складові погодних умов [1], представляє інтерес дослідити вплив саме цього кліматоутворювального фактора на формування полів атмосферних опадів на території України у зв'язку з глобальними кліматичними змінами.

Як відомо, для довгострокових прогнозів погоди необхідно глибоке вивчення реально існуючих

просторово-часових зв'язків між гідрометеорологічними процесами та ролі фізико-географічних факторів клімату. Перед сучасною кліматологією стоїть цілий ряд актуальних проблем, однією з яких є наддовгостроковий прогноз причин, які зумовлюють коливання клімату. І в останні роки значна увага приділяється перспективам використання статистично значущих кореляційних зв'язків між випадковими процесами значно віддалених один від одного районів (так званих «далеких зв'язків») стосовно задач, перш за все, довгострокового та наддовгострокового прогнозів по осередках додатних і від'ємних значень кореляції.

Н. Kutiel, Y. Benaroch, G. Korres у роботах [23, 24] описують режим атмосферної циркуляції, який виявлено наприкінці ХХ століття над територією Європейсько-Середземноморського регіону – Північноморське-Каспійське коливання (ПМКК) або North Sea-Caspian Pattern (NCP). Їх пропозиція заснована на ефекті диполя, який зареєстровано між Алжиром та Каїром в середньобагаторічних значеннях геопотенціальної висоти ізобаричної поверхні 500 гПа. Пізніше за допомогою методу лінійної кореляції були визначені основні центри (полюси) даного типу мінливості. Виявилось, що один центр локалізований над акваторією Північного моря, а інший – над північною частиною Каспійського моря. Для Східно-Європейського регіону вплив різних фаз Північноморського-Каспійського коливання на сумарну кількість опадів досліджено в меншій мірі, ніж вплив цього коливання на формування температурного режиму. Оскільки територія України розташована досить близько до одного з полюсів коливання, то даний тип мінливості представляє для нас особливий інтерес.

Крім того, у роботах [9, 10, 13, 14, 19, 25, 26] описано, що формування багатьох кліматичних полів над різними районами нашої планети залежить від північно-атлантичних макропроцесів. Саме Північно-Атлантичне коливання (ПАК) є однією з найважливіших характеристик макромасштабної циркуляції атмосфери у Північній півкулі, яке виражено в усі сезони року. ПАК відбиває коливання атмосферної маси між північчю і півднем Північної Атлантики з центром в районі Ісландії (мінімум) і в районі Азорських островів (максимум). В якості мінливості зазначеного кліматичного сигналу використовувався кліматичний індекс макромасштабної взаємодії за полем тиску – глобальний кліматичний індекс ПАК, який є сумарним вимірюванням стану циркуляції в середніх широтах Північної Атлантики. У дослідженні використовуються часові ряди

середніх значень індексу ПАК за кожний місяць року, які взято на сайті Кліматичного прогностичного центру США (CPC/NCER/NOAA). Індекс визначався по першій ортогональній компоненті розкладання EOF поля тиску на рівні моря для Північної півкулі (20-90° півн.ш.). Значення індексу нормалізуються відносно базового періоду 1979-2000 рр.

Відповідно до поставленої мети, реалізація комплексного статистичного підходу до визначення особливостей розподілення опадів весняного сезону по території України проводилася у два етапи з використанням методів багатовимірного статистичного аналізу, а саме кластерного та кореляційного аналізу.

Для районування території України за кількістю опадів сезону, що розглядався, був застосований «Універсальний адаптивний ітераційний метод кластерного аналізу» («УАІМКА»), який добре показав себе при кластеризації територій, порівняних з територією України. В цьому методі, в якості вхідної інформації виступає матриця  $X = (x_{ij})_{n \times m}$ , яка містить  $n$  векторів-рядків розмірності  $m$ , що характеризує статистичні ряди об'ємом  $m$  у  $n$  пунктах, які й повинні бути класифікованими. Кластеризації підлягало 40 векторів кількості опадів на станціях України, що були використані в дослідженні, за березень, квітень та травень ( $n=40$ ) 45-ої розмірності ( $m=45$ ). В якості апріорної інформації, на відміну від інших методів, задається тільки мінімальна кількість векторів  $\tau$ , які можуть скласти кластер.

На першому етапі в результаті реалізації алгоритму «УАІМКА» були отримані часові ряди середніх векторів визначених кластерів місячної кількості опадів весняного сезону, які будуть використані на наступному етапі дослідження.

За допомогою кореляційного аналізу визначався статистичний зв'язок між розподілом опадів по території України та двома відомими телеконекціями Північної півкулі, а саме Північно-Атлантичним і Північноморським-Каспійським коливаннями.

Для цього розраховувалась матриця кореляцій 25-го порядку. За кожний місяць весняного сезону проаналізовано 936 парних коефіцієнтів кореляції, які виражали лінійну кореляційну залежність між рядами середніх векторів місячної кількості опадів визначених кластерів за березень, квітень, травень ( $n=13$ ) та індексом NCP (NAO) за всі місяці року. Парні коефіцієнти кореляції приймалися статистично значущими на рівні значущості  $\alpha = 0,10$  і є вірогідними за умови значень  $|r_{xy}| \geq 0,32$  [20].

Матриця кореляцій визначається таким матричним рівнянням [21]:

$$R_x = \sigma^{-1} K_x \sigma^{-1}, \quad (1)$$

де

$K_x$  – матриця коваріацій;

$\sigma^{-1}$  – обернена матриця від діагональної матриці ( $\sigma$ ) середніх квадратичних відхилів.

Матриця кореляцій  $n$ -го порядку в координатній формі має вигляд:

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1s} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2j} & \dots & r_{2s} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{is} & \dots & r_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nj} & \dots & r_{ns} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

У матриці кореляцій (2) міститься інформація про структуру  $n$  полів кореляцій. Відомо, що особливості атмосферних процесів проявляються в статистичних характеристиках, зокрема в значеннях та знаках коефіцієнтів кореляції, які і будуть проаналізовані для визначення впливу північно-атлантичних та європейсько-середземноморських макропроцесів на розподіл опадів весняного сезону по території України.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

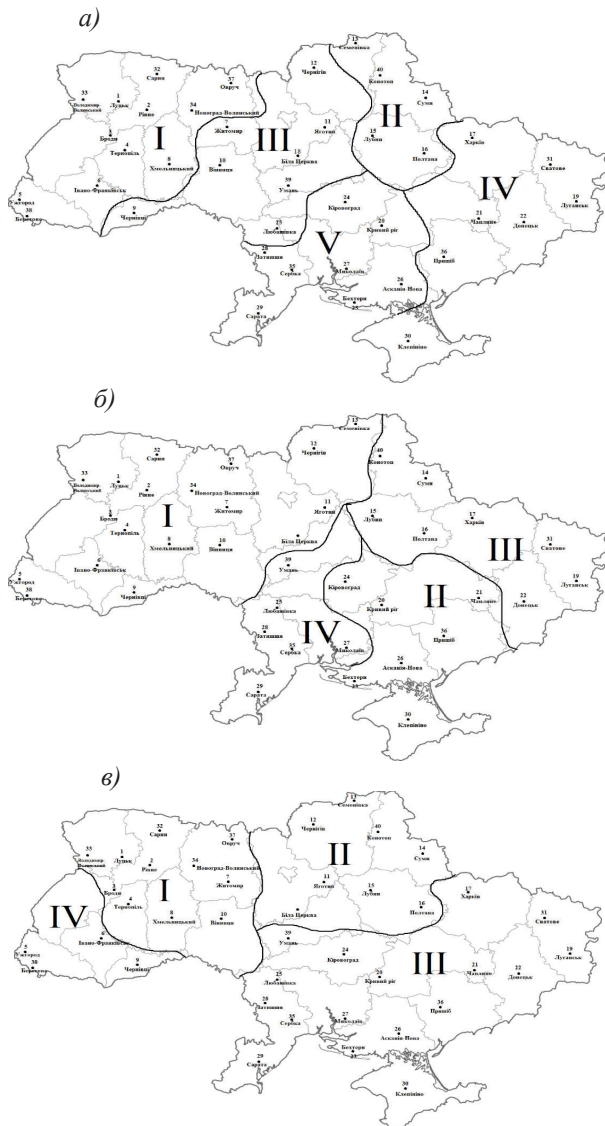
Реалізація задач, що визначені в цій статті, проводилася з застосуванням статистичного підходу в два етапи.

На першому етапі дослідження проведена об'єктивна кластеризація місячної кількості опадів весняного періоду та побудовані карти-схеми просторового розподілу важливого кліматичного показника зволоження для території України, які наводяться на рис. 1.

Як видно з рис. 1а, у березні на території України визначено п'ять кластерів: до першого увійшли райони західної та північно-західної України; до другого – північно-східна її територія; до третього кластера увійшли райони північної та ряд областей центральної України; до четвертого – південні та південно-західні регіони країни; до п'ятого – ряд областей центральної та південної України.

У квітні (рис. 1б) територія України поділена на чотири основних регіони: до першого увійшли станції західної та ряд областей північної частини; до другого – південні та південно-

східні області; третій кластер об'єднує східну та північно-східну територію країни; південна та частина центральної України увійшли до четвертого кластера.



а) – березень (03); б) – квітень (04); в) – травень (05).

Рис. 1 – Результати кластеризації місячної кількості опадів для території України

а) – march (03); б) – april (04); в) – may (05)

Fig. 1 – Results of monthly precipitation clustering for the Ukraine territory

На рис. 1в представлена карта-схема районування території за розподілом атмосферних опадів у травні. Як впливає з рис. 1в, територія країни була поділена на чотири кластери: до першого увійшли західна, північно-західна та ряд областей центральної України; до другого – північна територія країни; райони східної, південно-східної та південної частин України формують третій кластер. Найменшим за площиною

виявився четвертий кластер, який займає невелику частину Західної України.

Отримане районування території України за кластерами, по-перше, уточнює загальний кліматичний розподіл атмосферних опадів у весняний період і, по-друге, відділяє зони з різними характерними типами погоди при випадінні опадів по регіону, що досліджувався.

На другому етапі дослідження за допомогою кореляційного аналізу вдалося виявити статистично значущі зв'язки в полях атмосферних опадів на території України у весняний сезон з Північноморським-Каспійським та з Північно-Атлантичним коливаннями. Результати цього етапу представлені в табл.1-2. Для наочності, побудовані карти-схеми, на яких зображено сумісний вплив двох телеконекцій Північної півкулі, які розглядалися у дослідженні, і які впливають на просторовий розподіл атмосферних опадів по території України у весняний сезон (рис. 2).

В табл. 1 наводяться вірогідні парні коефіцієнти кореляції для статистичних зв'язків між NCP та кількістю атмосферних опадів у весняний сезон на території України. У дужках вказано номер кластера.

Таблиця 1 – Коефіцієнти кореляції (NCP – місячна кількість опадів)

Table 1 – Correlation coefficients (NCP – the monthly rainfall)

Місяць (NCP)	Місяць (опадів)		
	03	04	05
04	-	-0,58 (I)	-
05	-	-	0,32 (IV)
07	-	-0,32 (II) -0,36 (IV)	-
08	-	-	0,39 (I)
09	-	-	0,34 (III)
10	-	0,47 (I)	-
11	-	-	0,36 (IV)
12	-	-0,41 (III)	-

Як впливає з табл. 1, розподілення місячної кількості опадів на території України у березні не має статистично значущого зв'язку з Північноморським-Каспійським коливанням.

У квітні та травні з імовірністю 90% встановлено лінійний кореляційний зв'язок місячної кількості опадів за отриманими кластерами на території України з визначеним місяцем Північноморського-Каспійського коливання. Запізнення відгуків складає від трьох місяців до року (табл.1). Атмосферні опади майже на всій території України у квітні мають обернений лінійний

кореляційний зв'язок з індексами NCP. Коефіцієнти кореляції змінюються від -0,32 до -0,58. У травні, навпаки, цей зв'язок є прямим зі значеннями коефіцієнтів від 0,32 до 0,39 (I, III, IV кластери).

Проведене дослідження залежності місячної кількості атмосферних опадів від Північноморського-Каспійського колювання підтверджує існування статистично значущого впливу європейсько-середземноморських макропроцесів на просторовий розподіл весняних опадів по території України.

Враховуючи вплив баричного поля Північної Атлантики на формування регіонального клімату та його складових в Східно-Європейському секторі, за допомогою кореляційного аналізу було проведено дослідження статистичних зв'язків між місячною кількістю опадів (ряди середнього вектора кожного з визначених кластерів) на території України та Північно-Атлантичним коливанням (індекс NAO).

В табл. 2 представлені вірогідні парні коефіцієнти кореляції між двома випадковими процесами – Північно-Атлантичним коливанням, кількісною мірою якого виступає індекс NAO, та кількістю опадів за місяці весняного періоду. У дужках вказано номер кластера.

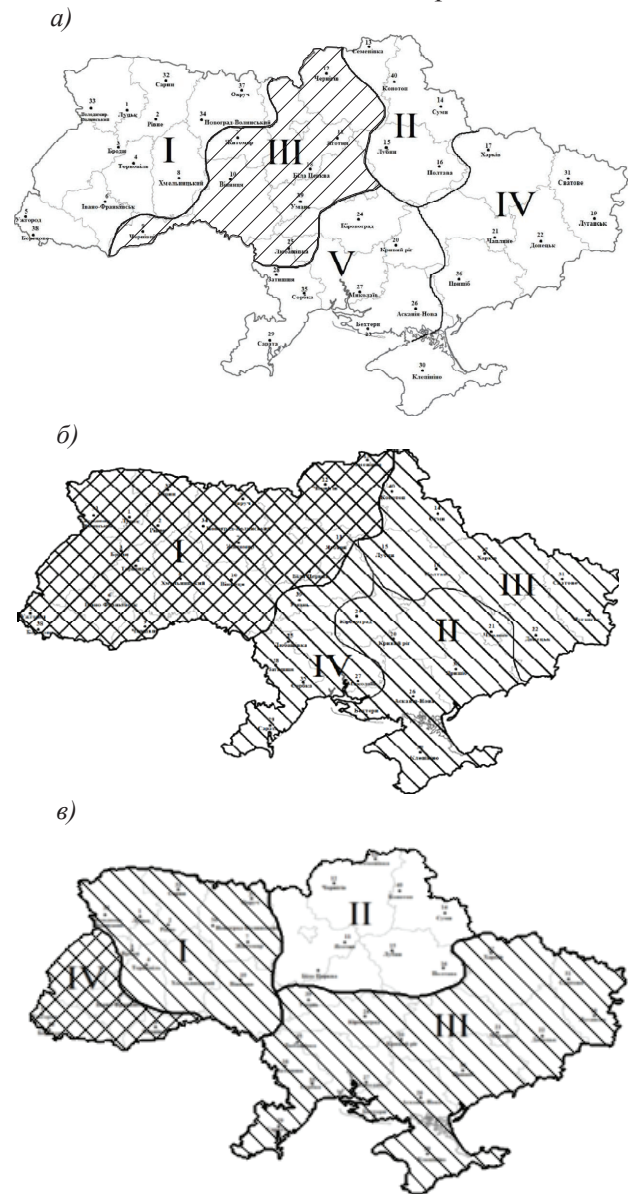
**Таблиця 2** – Коефіцієнти кореляції (NAO – місячна кількість опадів)  
**Table 2** – Correlation coefficients (NAO – the monthly rainfall)

Місяць (NAO)	Місяць (опад)		
	03	04	05
01	-0,32 (III)	-	0,33 (IV)
05	-	-	0,41 (IV)
07	0,33 (I)	0,33 (I)	-

Як випливає з табл. 2, формування опадів на території України у весняний період з імовірністю 90% залежить від стану Північно-Атлантичного коливання. Спостерігається як прямий, так і обернений лінійний кореляційний зв'язок між середніми векторами визначених кластерів місячної кількості опадів з однією з основних телеконекцій Північної півкулі – Північно-Атлантичним коливанням. Запізнення відгуків складає від двох місяців до одного року.

Отримані результати вказують на те, що стан ПАК слід враховувати для довгострокового прогнозу атмосферних опадів у березні ряду областей північної, центральної та південної території України (III кластер). Підтвердженням цього є значення коефіцієнта кореляції -0,32, який є вірогідним з імовірністю 90%.

Вплив ПАК на розподіл атмосферних опадів по території України у квітні чітко проявляється для всієї західної та ряду областей північної її території (I кластер). Коефіцієнт кореляції дорівнює 0,33, що вказує на прямий лінійний кореляційний зв'язок між вказаними процесами.



▨ - ПМКК ▨ - ПАК ▨ - ПАК+ПМКК

а) – березень (03); б) – квітень (04); в) – травень (05)

**Рис. 2** – Карти-схеми сумісних впливів двох телеконекцій на просторовий розподіл опадів по території України

а) – march (03); б) – april (04); в) – may (05)

**Fig. 2** – Combined effects maps of schemes of two teleconnections on the precipitation spatial distribution on the Ukraine territory

У травні вплив баричного поля Північної Атлантики на формування атмосферних опадів доцільно враховувати тільки незначній території Західної України (IV кластер).

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Дослідження впливу північно-атлантичних та європейсько-середземноморських макропроцесів на розподіл місячної кількості опадів по території України, яке проведено з застосуванням статистичного підходу, свідчить про його неоднозначність в різні місяці весняного сезону і в різних областях України, що потребує подальших досліджень при вирішенні загальної наукової проблеми.

2. На основі багаторічних емпіричних даних про атмосферні опади за березень, квітень і травень здійснена об'єктивна кластеризація, яка дозволила отримати розбиття території України на регіони з різними характерними типами погоди при випадінні опадів у весняний сезон. У березні визначено 5, а в квітні та травні – по 4 кластери, кожний з яких є статистично обґрунтованим.

3. Використання еквідистантних емпіричних даних за 45-річний період дозволило побудувати вірогідні статистичні моделі у вигляді карт-схем для кожного місяця весняного сезону, які, на наш погляд, детально представляють особливості просторового розподілу місячної кількості опадів по території України у цей сезон.

4. Для довгострокового прогнозування місячної кількості опадів у березні доцільно враховувати стан Північно-Атлантичного колювання (ПАК) лише для Чернівецької, Вінницької, Черкаської, Київської, північної частини Одеської, західних районів Чернігівської та південної частини Житомирської областей (III кластер). На всій території України з заданою ймовірністю (90%) не виявлено статистично значущого впливу Північноморського-Каспійського колювання (ПМКК) на формування атмосферних опадів у першій весняний місяць.

5. Формування атмосферних опадів у квітні на всій території Західної України і на територіях Вінницької, Київської, Житомирської та Чернігівської областей залежить від стану як ПАК, так і від ПМКК (I кластер). На решті території України з ймовірністю 90% виявлено залежність атмосферних опадів лише від ПМКК (II, III, IV кластери).

6. В областях Західної України (Чернівецька, Івано-Франківська, Ужгородська, Львівська) довгострокове прогнозування місячної кількості опадів у травні доцільно проводити з врахуванням як ПАК, так і ПМКК (IV кластер). Для ряду областей Північної України, а саме: Київської, Чернігівської, Сумської та центральних районів (Полтавська та північ Черкаської областей) з

ймовірністю 90% не вдалося виявити зв'язок між атмосферними травневими опадами та основними телеконекціями Північної півкулі, що були задіяні у дослідженні (II кластер). Крім того, у травні вплив європейсько-середземноморських макропроцесів (ПМКК) простежується на значній території України (I, III, IV кластери).

7. Отримані карти-схеми підтверджують існування лінійної кореляційної залежності просторового розподілу атмосферних опадів весняного сезону на території України від стану Північно-Атлантичного та Північноморського-Каспійського колювань. Вони дозволять визначити напрямки переносу основних субстанцій, а це в свою чергу допоможе при складанні кліматичних прогнозів погоди зрозуміти вклад різних районів Північної півкулі в формування основного кліматичного показника зволоження території України у весняний сезон.

8. Результати, що представлені у статті, безперечно, не можна вважати вичерпаними в плані визначення впливу лише двох телеконекцій, які можуть формувати просторово-часовий розподіл атмосферних опадів по території України. Розв'язання задач у подальшому буде направлено на дослідження впливу на розподіл опадів інших відомих телеконекцій Північної та Південної півкуль з залученням додаткових еквідистантних часових рядів емпіричних даних.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Видавництво Раєвського, 2003. 343 с.
2. Осадчий В. І., Бабіченко В. М. Температура повітря на території України в сучасних умовах клімату. *Український географічний журнал*. 2013. № 4. С. 32-39.
3. Светличный А. А., Ибрагимова М. С. К вопросу о современных изменениях климата Северо-Западного Причерноморья. *Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки*. 2016. Т. 21 (1). С. 22-41.
4. Балабух В. О., Зібцев С. В. Вплив зміни клімату на кількість та площу лісових пожеж у Північно-Чорноморському регіоні України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. №18. С. 60-71. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07>
5. Швер Ц. А. Атмосферные осадки на территории СССР. Ленинград : Гидрометеоздат, 1983. 485 с.
6. Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 рр.) / за ред. В. М. Ліпінського, В. І. Осадчого, В. М. Бабіченко. Київ, 2006. 311 с.
7. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України / за ред. С. М. Степаненка, А. М. Польового. Одеса : Видавництво ТЕС, 2015. 520 с.
8. Нажмудінова О. М., Єрмоленко Н. С. Деякі аспекти формування інтенсивних посушливих явищ влітку 2010 р. над Східною Європою. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2011. №9. С. 79-84.

9. Зміна погодних умов на території України в умовах зміни клімату / Хохлов В. М., Боровська Г. О., Уманська О. В., Тенетко М. С. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. №17. С. 31-37. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.04>
10. Хохлов В. М., Єрмоленко Н. С. Майбутні зміни клімату та їх вплив на режим опадів та температури в Україні. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. № 16. С. 76-82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10>
11. Умови формування зон небезпечного вітру на території України / Івус Г. П., Зубкович С. О., Хоменко Г. В., Ковальков І. А. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2014. №18. С. 48-55.
12. Шурда К. Е. Реалії України у процесі сучасної зміни клімату. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2014. №18. С. 56-64.
13. Гончарова Л. Д., Косолапова Н. І. Вплив основних телеконекцій Північної півкулі на режим опадів по території України. *Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки*. 2017. Т. 22. Вип. 1 (30). С. 11-27.
14. Гончарова Л. Д., Решетченко С. І. Вплив Північної Атлантики на температуру повітря, опади, приземний тиск на Лівобережній Україні. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2010. №. 7. С. 45-52.
15. Польовий А. М., Божко Л. Ю. Характеристика радіаційно-теплових ресурсів в Україні на період до 2050р. в умовах зміни клімату. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. №17. С. 70-78. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.08>
16. Польовий А. М., Шаблій О. В. Радіаційно-теплові ресурси степової зони України на період до 2050 р. під впливом змін клімату. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. №18. С. 82-89. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.09>
17. Переведенцев Ю. П. Теория климата : учебное пособие. 2-ое изд. перераб. и доп. Казань : Казан. гос. ун-т, 2009. 504 с.
18. Казакевич Д. И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. Ленинград : Гидрометиздат, 1971. 268 с.
19. Гончарова Л. Д. Воздушные течения тропосферы и стратосферы северного полушария : монография. Одесса : ТЭС, 2014. 298 с.
20. Гончарова Л. Д., Школьний С. П. Методи обробки та аналізу гідрометеорологічної інформації (збірник задач і вправ) : навчальний посібник. Одеса : Екологія, 2007. 464 с.
21. Гончарова Л. Д. Методи багатовимірної статистичної аналізу метеорологічних полів та атмосферних процесів : навчальний посібник. Одеса : ТЕС, 2016. 196 с.
22. Серга Э. Н. Универсальный адаптивный итерационный метод кластерного анализа. *Метеорологія, кліматологія та гідрологія: міжвід. Наук. зб. України*. Одеса. 2003. Вип. 47. С. 83-89.
23. Kutiel H, Benaroch Y. North Sea-Caspian (NCP) – an upper level atmospheric teleconnection affecting the Eastern Mediterranean: Identification and definition. *Theor. Appl. Climatol.* 2002. 71. Pp. 17-28.
24. Korres G., Pinardi N., Lascaratos A. The ocean response to low-frequency interannual atmospheric variability in the Mediterranean Sea. Part. I: Sensitivity experiments and energy analysis *J. Climate*. 2000. 13. Pp. 705-731.
25. Полонский А. Б. Роль океана в изменениях климата : монография. Киев : Думка, 2008. 184 с.
26. Bodri L., Cermak V. High frequency variability in recent climate and the north Atlantic oscillation. *Theor. Appl. Climatol.* 2003. 74. Pp. 33-40.

## REFERENCES

1. Lipinskiy, V.M., Diachuk, V.A. & Babichenko, V.M. (eds) (2003). *Klimat Ukrainy*. Kyiv : Publ. Raievskoho. (in Ukr.)
2. Osadchyi, V.I. & Babichenko, V.M. (2013). Temperatura povitria na terytorii Ukrainy v suchasnykh umovakh klimatu [Air temperature on the Ukrainian territory under current climate condition]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal [Ukrainian geographical journal]*, 4, pp. 32-39. (in Ukr.)
3. Svetlichnyy, A.A. & Ibragimova, M.S. (2016). K voprosu o sovremennykh izmeneniyah klimata Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya [To the problem of current climate change over North-West Black-Sea Region]. *Visnyk ONU. Ser.: Heohrafichni ta heolohichni nauky [Bulletin ONU. Ser.: Geographic and Geologic Science]*, 21(1), pp. 22-41. (in Russ.)
4. Balabukh, V.O. & Zibtsev, S.V. (2016). Vplyv zminy klimatu na kilkist ta ploshchu lisovykh pozhezh u Pivnichno-Chornomorskomu rehioni Ukrainy [Climate change impact on the number and area of forest fire over North Black-Sea Region in Ukraine]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 18, pp. 60-71. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07> (in Ukr.)
5. Shver, Ts.A. (1983). *Atmosfernye osadki na territorii SSSR [Atmospheric precipitation on the territory of USSR]*. Leningrad : Gidrometeoizdat. (in Russ.)
6. Lipinskiy, V.M., Osadchyi, V.I. & Babichenko, V.M. (eds) (2006). *Stykhiini meteorolohichni yavyshecha na terytorii Ukrainy za ostannie dvadtsiatyrichchia (1986-2005 rr.) [Natural meteorological phenomena on the territory of Ukraine for the last twenty years (1986-2005)]*. Kyiv. (in Ukr.)
7. Stepanenko, S.M. & Poliovyi, A.M. (eds) (2015). *Klimatichni zminy ta ikh vplyv na sfery ekonomiky Ukrainy [Climate change and its impact on the economy of Ukraine]*. Odesa : Publ. TES. (in Ukr.)
8. Nazhmudinova, O.M. & Yermolenko, N.S. (2011). Deiaki aspekty formuvannya intensyvykh posushlyvykh yavyshech vlitku 2010 r. nad Skhidnoiu Yevropoiu [Some aspects of the formation of intense droughts in the summer of 2010 over Eastern Europe]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 9, pp. 79-84. (in Ukr.)
9. Khokhlov, V.M. et al. (2016). Zmina pohodnykh umov na terytorii Ukrainy v umovakh zminy klimatu [Changes of weather conditions in Ukraine under climate changes]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 17, pp. 31-37. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.04> (in Ukr.)
10. Khokhlov, V.M. & Yermolenko, N.S. (2015). Maibutni zminy klimatu ta yikh vplyv na rezhym opadiv ta temperatury v Ukraini [Future climate change and its impact on precipitation and temperature in Ukraine]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 16, pp. 76-82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10> (in Ukr.)
11. Ivus, H.P. et al. (2014). Uмовы formuvannya zon nebezpechnoho vitru na terytorii Ukrainy [Conditions for the formation of dangerous wind zones on the territory of Ukraine]. *Visnyk Odes'kogo derzhavnogo ekolohichnogo universitetu [Bulletin of Odessa state environmental university]*, 18, pp. 48-55. (in Ukr.)
12. Shurda, K.E. (2014). Realii Ukrainy u protsesi suchasnoi zminy klimatu [Realities of Ukraine in the process of current climate change]. *Visnyk Odes'kogo derzhavnogo ekolohichnogo universitetu [Bulletin of Odessa state environmental university]*, 18, pp. 56-64. (in Ukr.)

13. Honcharova, L.D. & Kosolapova, N.I. (2017). Vplyv osnovnykh telekoneksii Pivnichnoi pivkuli na rezhym opadiv po te-rytorii Ukrainy [Influence of the main teleconnections of the Northern Hemisphere on the precipitation regime on the territory of Ukraine]. *Visnyk ONU. Ser.: Heohrafichni ta heolohichni nauky [Bulletin ONU. Ser.: Geographic and Geologic Science]*, 22, 1 (30), pp. 11-27. (in Ukr.)
14. Honcharova, L.D. & Reshetchenko, S.I. (2010). Vplyv Pivnichnoi Atlantyky na temperaturu povitria, opady, pryzemnyi tysk na Livoberezhnii Ukraini [Influence of the North Atlantic on air temperature, precipitation, surface pressure on the Left Bank of Ukraine]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 7, pp. 45-52. (in Ukr.)
15. Polovyi, A.M. & Bozhko, L.Iu. (2016). Kharakterystyka radiatsiino-teplovyykh resursiv v Ukraini na period do 2050r. v umovakh zminy klimatu [Characteristics of radiation and thermal resources in Ukraine for the period up to 2050 in the context of climate change]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 17, pp. 70-78. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.08> (in Ukr.)
16. Polovyi, A.M. & Shablii, O.V. (2016). Radiatsiino-teplovi resursy stepovoi zony Ukrainy na period do 2050r. pid vplyvom zmin klimatu [Radiation and thermal resources of the steppe zone of Ukraine for the period up to 2050 under the influence of climate change]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 18, pp. 82-89. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.09> (in Ukr.)
17. Perevedentsev, Yu.P. (2009). *Teoriya klimata [Climate theory]*. 2-nd ed. revised and supplemented. Kazan': Kazan' State Un-ty. (in Russ.)
18. Kazakevich, D.I. (1971). *Osnovy teorii sluchaynykh funktsiy i ee primeneniye v gidrometeorologii [Fundamentals of the theory of random functions and its application in hydrometeorology]*. Leningrad : Gidrometizdat. (in Russ.)
19. Goncharova, L.D. (2014). *Vozdushnye techeniya troposfery i stratosfery severnogo polushariya [Air currents of the troposphere and stratosphere of the northern hemisphere]*. Odessa: TES. (in Russ.)
20. Honcharova, L.D. & Shkolnyi, Ye.P. (2007). *Metody obrobky ta analizu hidrometeorologichnoi informatsii (zbirnyk zadach i vprav) [Methods of processing and analysis of hydrometeorological information (collection of tasks and exercises)]*. Odessa: Ekolohiia. (in Ukr.)
21. Honcharova, L.D. (2016). *Metody bahatovymirnoho statystychnoho analizu meteorologichnykh poliv ta atmosfernykh protsesiv [Methods of multidimensional statistical analysis of meteorological fields and atmospheric processes]*. Odessa: TES. (in Ukr.)
22. Serga, E.N. (2003). Universal'nyy adaptivnyy iteratsionnyy metod klasterного analiza [Universal adaptive iterative method of cluster analysis]. *Meteorolohiia, klimatolohiia ta hidrolohiia [Meteorology, climatology and hydrology]*, 47, pp. 83-89. (in Russ.)
23. Kutiel, H. & Benaroch, Y. (2002). North Sea-Caspian (NCP) – an upper level atmospheric teleconnection affecting the Eastern Mediterranean: Identification and definition. *Theor. Appl. Climatol.*, 71, pp. 17-28.
24. Korres, G., Pinardi, N. & Lascaratos, A. (2000). The ocean response to low-frequency interannual atmospheric variability in the Mediterranean Sea. Part. I: Sensitivity experiments and energy analysis. *J. Climate*, 13, pp. 705-731.
25. Polonskiy, A.B. (2008). *Rol' okeana v izmeneniyakh klimata [Ocean role in climate change]*. Kiev: Dumka. (in Russ.)
26. Bodri, L. & Cermak, V. (2003). High frequency variability in recent climate and the north Atlantic oscillation. *Theor. Appl. Climatol.*, 74, pp. 33-40.

## INFLUENCE OF ATMOSPHERIC MACROPROCESSES ON THE SPATIAL DISTRIBUTION OF SPRING PRECIPITATION WITHIN THE TERRITORY OF UKRAINE

**L.D. Goncharova<sup>1</sup>, O.M. Prokofiev<sup>1</sup>, S.I. Reshetchenko<sup>2</sup>, A.V. Chernichenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, [goncharova.luda.50@gmail.com](mailto:goncharova.luda.50@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-6340-2424>

<sup>2</sup> V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022

The article presents the results of a comprehensive statistical study of the spatial distribution of spring precipitation in Ukraine and its relationship with the main low-frequency oscillations of the Northern Hemisphere. The research focuses on the monthly amount of rainfalls in March, April and May at 40 long-range stations of Ukraine that are evenly distributed throughout its territory, and the indices of North Atlantic (NAO) and North Sea-Caspian (NCP) fluctuations over a 45-year period (1962-2006). The use of multiyear data allowed for objective clusterization and division of the Ukrainian territory into regions with different types of weather observed in the event of precipitation, with each of them being physically substantiated. To ensure clarity, the article presents regional statistical models in the form of schematic maps of probable relationships between distribution of spring precipitation in Ukraine and the North Atlantic and Euro-Mediterranean macroprocesses. In order to forecast the monthly rainfall in March, it is advisable to take into account the state of the North Atlantic fluctuations. The response of this fluctuation was found within Chernivtsi, Vinnytsia, Cherkasy, Kyiv Regions, northern part of Odessa Region, western districts of Chernihiv Region and southern part of Zhytomyr Region. In the western regions of Ukraine, as well as in Vinnytsia, Kyiv, Zhytomyr and Chernihiv Regions, the formation of precipitation in April depends on the state of both NAO and NCP; in the rest of Ukraine – only

of NCP. The 90% probability linear statistical relationship between precipitation in May and the main climatic signals of the Northern Hemisphere under study was not found only in some northern regions of Ukraine, namely: Kyiv, Chernihiv, Sumy Regions and central (Poltava and northern part of Cherkasy Region) part of Ukraine. A study of the influence of North Atlantic and Euro-Mediterranean macroprocesses on the distribution of monthly rainfall in Ukraine, conducted using a statistical approach, shows its ambiguity during different spring months and within different regions of Ukraine, and requires further research to solve the general scientific problem – study of climate-conditioned natural resources required to ensure sustainable socio-economic development of Ukraine under conditions of global climate change.

**Keywords:** climate; cluster analysis; correlation coefficient; long-range low-frequency oscillations; atmospheric circulation.

## ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ МАКРОПРОЦЕССОВ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСАДКОВ ПО ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ В ВЕСЕННИЙ СЕЗОН

Л.Д. Гончарова<sup>1</sup>, О.М. Прокофьев<sup>1</sup>, С.И. Решетченко<sup>2</sup>, А.В. Черниченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Одеський державний екологічний університет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [goncharova.luda.50@gmail.com](mailto:goncharova.luda.50@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-6340-2424>

<sup>2</sup> Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, площадь Свободы 4, 61022, Харьков

В статье приведены результаты комплексного статистического исследования пространственного распределения осадков весеннего сезона на территории Украины и его связь с основными низкочастотными колебаниями Северного полушария. Предметом исследования является месячное количество осадков за март, апрель, май на 40 длиннорядных станциях Украины, равномерно расположенных по ее территории, и индексы Североатлантического (САК) и Североморского-Каспийского (СМКК) колебаний за 45-летний период (1962-2006 гг.). Использование многолетних данных позволило осуществить объективную кластеризацию и провести разбиение территории Украины на регионы с разными характерными типами погоды при выпадении атмосферных осадков, каждый из которых является физически обоснованным. Для наглядности в статье приведены региональные статистические модели в виде карт-схем достоверных связей между распределением атмосферных осадков по территории Украины в весенний сезон и североатлантическими и европейско-средиземноморскими макропроцессами. Для прогнозирования месячного количества осадков в марте целесообразно учитывать состояние Североатлантического колебания. Отклик этого колебания обнаружили на территориях Черновицкой, Винницкой, Черкасской, Киевской, северной части Одесской, западных районов Черниговской и южной части Житомирской областей. В западных районах Украины, а также в Винницкой, Киевской, Житомирской и Черниговской областях формирование атмосферных осадков в апреле зависит от состояния как САК, так и СМКК; на остальной территории Украины – только от СМКК. Не удалось с вероятностью 90% выявить линейную статистическую зависимость между осадками в мае и основными климатическими сигналами Северного полушария, которые рассматривались только для некоторых северных областей Украины, а именно: Киевской, Черниговской, Сумской и центральных (Полтавская и север Черкасской) регионов Украины. Исследование влияния северо-атлантических и европейско-средиземноморских макропроцессов на распределение месячного количества осадков по территории Украины, проведенного с применением статистического подхода, свидетельствует о его неоднозначности в разные месяцы весеннего сезона и в разных областях Украины, что требует дальнейших исследований при решении общей научной проблемы - исследование климато-обусловленных природных ресурсов для обеспечения устойчивого социально-экономического развития Украины в условиях изменений глобального климата.

**Ключевые слова:** климат; кластерный анализ; коэффициент корреляции; низкочастотные колебания дальнего действия; атмосферная циркуляция.

Подання до редакції : 17. 02. 2021  
Надходження остаточної версії : 17. 06. 2021  
Публікація статті : 30. 06. 2021



УДК 551.51

## ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ГРОЗ НА АМСЦ ОДЕСА НА ПОЧАТКУ ХХІ СТОЛІТТЯ

Л. В. Недострелова, В. В. Чумаченко

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [nedostrelova@ukr.net](mailto:nedostrelova@ukr.net)  
<https://orcid.org/0000-0001-8532-0481>

В статті представлено результати дослідження грозової діяльності на АМСЦ Одеса за період 2000-2019 рр. В умовах інтенсивного потепління грозова активність реагує на зміни температури, вологості, радіаційного режиму та складу атмосфери. Сучасні кліматичні зміни, що характеризуються підвищенням температури повітря, мають вирішальний вплив на умови формування небезпечних явищ погоди, тому моніторинг утворення грозових явищ на території України є актуальним питанням.

В роботі проведено аналіз синоптичних умов формування грозової діяльності: внутрішньомасові процеси, фронтальна діяльність, досліджено добуву й денну мінливість кількості випадків гроз за наведений період. В якості вхідних даних для визначення особливостей грозової діяльності над Одесою було використано дані щоденних метеорологічних спостережень за атмосферними явищами на АМСЦ Одеса за період 2000-2019 роки. Було опрацьовано авіаційні щоденники погоди АВ-6 для виявлення наявності, часу й тривалості грозової активності. Для аналізу типу явища використовувався синоптичний матеріал: інтерактивна база АРМсин, приземні синоптичні карти за строки спостереження перед та під час грози.

Встановлено, що протягом періоду дослідження внутрішньомасові грози сформувалися у 370 випадках грозової діяльності в пункті спостереження. Фронтальні грози утворюються рідше, в 241 випадку за 20 років. Найбільша кількість таких гроз формується на холодному фронті і становить 129 випадків. На фронті оклюзії виявлено 75 гроз. Мінімум зафіксовано на теплому фронті, всього 37 випадків, що становить 15 % від загальної кількості фронтальних утворень.

Протягом досліджуваного періоду зафіксовано 620 випадків гроз, з яких 195 гроз – це сухі грози. Значна увага приділяється добовій і денній мінливості кількості гроз на АМСЦ Одеса. У добовому ході більша кількість гроз спостерігається в денні години і складає 393 випадки, з яких 130 випадків сухих гроз. Нічні грози становлять 227 випадків, з них 65 – сухі грози. В денному розподілі виявлено більшу кількість гроз в післяполудневі години.

**Ключові слова:** грозова активність; зміна клімату; фронтальні грози; внутрішньомасові грози; синоптичні умови; добовий хід; денний розподіл

### 1. ВСТУП

Сучасні зміни клімату можна вважати встановленим фактом і є всі підстави думати, що вони будуть мати негативні і непередбачувані наслідки для багатьох галузей економіки країни. Інтенсивність і повторюваність погодних і кліматичних аномалій останнім часом зростає як в Україні, так і в світі. Для стратегічного планування стійкого розвитку регіонів і формування державної програми адаптації до кліматичних змін необхідно чітко уявляти зміни режиму багатьох метеорологічних величин, що визначають клімат [1-3]. Важливе місце належить питанню зміни режиму хмарності, а також повторюваності й інтенсивності стихійних явищ, що її супроводжують. Чисельні небезпечні метеорологічні явища – сильний дощ, сильний вітер, град,

шквал, смерч часто спостерігаються при грозах. Грози є одним з небезпечних явищ погоди, пов'язаних з конвективною хмарністю [4-7].

Гроза є наслідком нестійкості атмосфери, що проявляється у появі значних вертикальних рухів вологого повітря при великих температурних градієнтах і утворенні потужних купчастих і купчасто-дощових хмар. Головним процесом, що зумовлює утворення гроз всередині однорідних повітряних мас, є термічна конвекція у чистому вигляді або в поєднанні з динамічною, чи під впливом орографії місцевості. Внутрішньомасові грози та зливи утворюються над континентом головним чином влітку в післяполудневі години, коли температура повітря біля поверхні землі максимальна; над морем ці явища спостерігаються найчастіше взимку та в нічні години.

Типовими синоптичними ситуаціями виникнення внутрішньомасових гроз є тилова частина циклону та циклон, що заповнюється. В південних областях України вертикальна потужність хмар сягає 8...10 км, тобто майже до тропопаузи. На решті території України ці грози проявляються мляво, тому що хмари вертикально розвиваються до 4...5 км, а вище існують затримуючі (інверсійні) шари [4, 6, 7].

Фронтальні грози утворюються внаслідок витіснення теплого вологого повітря наступаючим валом холодного. Зона грозової діяльності (значної горизонтальної протяжності) звичайно розміщується вздовж фронту на декілька сот, а впоперек фронту на декілька десятків кілометрів. Найбільш сприятливі умови для потужного розвитку купчасто-дошових хмар з сильними грозами та зливами утворюються при дивергенції висотних повітряних течій. Грозові хмари на холодних фронтах часто досягають висоти тропопаузи, а іноді перевищують її. Грози теплих фронтів виникають над Україною значно рідше, їх найбільша активність у вечірні та нічні години, коли циклони рухаються з півдня та південного заходу, а в їх теплі сектори виносяться маси вологого тропічного повітря [4-7].

На особливу увагу заслуговують сильні грози, які супроводжуються одночасно зливами з градом, шквалами та іноді смерчами. Утворення подібних надзвичайних явищ погоди спостерігається поблизу чи в центрі невеликого хвильового збурення, де існують зони з досить контрастними температурами. В теплій повітряній масі денні температури звичайно перевищують 30...35 °С, а в холодному повітрі вони коливаються в межах 16...22 °С. Потужні грозові хмари із зливами виникають поблизу центра збурення в післяполудневі години [4].

Одночасно із зливами при грозах спостерігаються електричні розряди (блискавки) між хмарами чи між хмарами і землею, а також різке посилення вітру у вигляді вихорів з горизонтальною (шкваловий ворот) та іноді вертикальною (смерч) осями [4-7].

Дослідження останніх десятиліть показали, що грозова активність чутливо реагує на зміни радіаційного режиму, вологості, температури та складу атмосфери. Вивчення сучасних регіональних особливостей формування гроз є основною метою моніторингу грозових явищ. Сучасні кліматичні зміни, що характеризуються підвищенням температури повітря, мають вирішальний вплив на умови формування небезпечних явищ погоди [1, 4, 8-12], тому моніторинг утворення грозових явищ на території України є ак-

туальним питанням, а дослідження умов формування і їх динаміки в часовому масштабі метою даної роботи.

## 2. ОПИС МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Україна має складний характер атмосферних процесів і умов погоди. Територія країни знаходиться на стику циркуляційних систем помірних і субтропічних широт. У ряді досліджень автори виділяють три характерні особливості циркуляції в Україні: ослаблення циклонічної і посилення антициклонічної діяльності, різноманіття і складність сезонних змін атмосферної циркуляції, ослаблення активності атмосферних процесів [13].

Відомо, що в Україну часто переміщуються повітряні маси з північних районів Атлантики і арктичних морів, рідше з центральної частини Атлантичного океану і Середземного моря [13]. Однак, найбільшу повторюваність має континентальне повітря. Воно формується над великими рівнинами материка Євразії з поступаючих сюди мас арктичного і континентального помірного повітря. При наявності малоградієнтних областей підвищеного тиску територія України може служити осередком формування континентального помірного повітря взимку, а влітку – континентального тропічного повітря. Перенесення повітряних мас на Україну відбувається при різних циркуляційних процесах. Вони відрізняються різноманіттям форм і сезонними особливостями, що значною мірою зумовлює часту зміну і складність погодних умов [13].

В якості вхідних даних для визначення особливостей грозової діяльності над Одесою було використано дані щоденних метеорологічних спостережень за атмосферними явищами на АМСЦ Одеса за період 2000-2019 роки. Було опрацьовано авіаційні щоденники погоди АВ-6 для виявлення наявності, часу й тривалості грозової активності. Для аналізу типу явища використовувався синоптичний матеріал: інтерактивна база АРМсин, приземні синоптичні карти за строки спостереження перед та під час грози.

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для дослідження типізації гроз, як зазначалося вище, було зроблено аналіз синоптичного матеріалу в періоди, коли над пунктом спостереження відбувалися процеси грозоутворень. В табл. 1 наведено розподіл грозової діяльності за аеро-синоптичними умовами формування.

**Таблиця 1** – Кількість випадків фронтальних і внутрішньомасових гроз на АМСЦ Одеса**Table 1** – Number of cases of frontal and intramass thunderstorms at the AMSC Odesa

Рік	Види гроз			Внутрішньомасова гроза
	Фронтальна гроза			
	Фронт оклюзії	Теплий фронт	Холодний фронт	
2000	1	3	6	14
2001	6	0	2	21
2002	2	2	5	10
2003	5	2	8	12
2004	2	2	5	15
2005	3	0	8	21
2006	1	1	5	19
2007	5	2	7	10
2008	1	3	10	25
2009	8	2	18	33
2010	5	4	2	24
2011	3	0	6	17
2012	1	0	12	25
2013	6	1	3	26
2014	1	4	4	26
2015	1	0	2	14
2016	10	1	4	10
2017	6	2	12	16
2018	6	4	5	18
2019	2	4	5	14
Всього	241			370

Протягом 2000 року спостерігається 10 гроз за фронтальним походженням, з яких на фронті оклюзії (ФО) зафіксовано 1 випадок, на теплому фронті (ТФ) – 3 і на холодному фронті (ХФ) – 6 гроз. Внутрішньомасових визначено 14 випадків. В 2001 році спостерігається 8 фронтальних гроз, з яких на ФО – 6 випадків, ХФ – 2 грози, на теплому фронті грози відсутні. Внутрішньомасових гроз в цьому році виявлено 21 випадок. Для 2002 року характерним є наявність 9 випадків за фронтальним походженням, з яких ФО – 2, ТФ – 2 та ХФ – 5. Внутрішньомасових гроз виявлено 21 випадок. За 2003 рік внутрішньомасових гроз визначено 12 випадків, 15 гроз за фронтальним походженням, з яких ФО – 5, ТФ – 2 та ХФ – 8 гроз. В 2004 році спостерігається 9 випадків за фронтальним походженням, з яких ФО – 2, ТФ – 2 та ХФ – 5 гроз. Внутрішньомасових гроз було виявлено 15 випадків. У 2005 році визначено 11 випадків фронтальних гроз, з яких ФО – 3, ТФ – 0 та ХФ – 8 випадків. Гроз за внутрішньомасовим походженням зафіксовано 21 випадок. В 2006 році спостерігається 7 гроз за фронтальним походженням, з яких

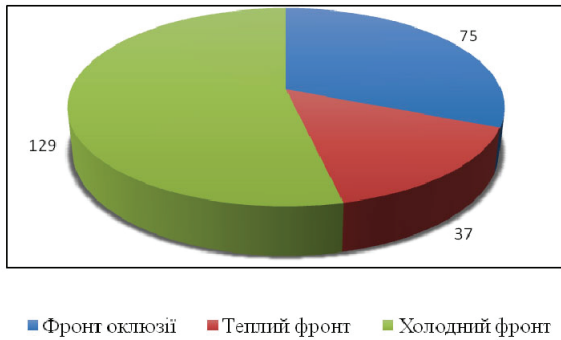
ФО – 1, ТФ – 1 та ХФ – 5 гроз. Внутрішньомасові грози становлять 19 випадків. У 2007 році внутрішньомасових було 10, а за фронтальним походженням виявлено 14 випадків, з яких ФО – 5, ТФ – 2 та ХФ – 7. 2008 рік характеризується наявністю 14 випадків за фронтальним походженням, з яких ФО – 1, ТФ – 3 та ХФ – 10. Внутрішньомасових гроз було виявлено 25 випадків. Протягом 2009 року спостерігається 28 випадків за фронтальним походженням, з яких ФО – 8, ТФ – 2 та ХФ – 18. Гроз за внутрішньомасовим походженням зафіксовано 33 випадки. У 2010 році було виявлено 11 гроз за фронтальним походженням, з яких ФО – 5, ТФ – 4 та ХФ – 2. Внутрішньомасових явищ визначено 24 випадки.

В 2011 року спостерігається 9 випадків фронтальних гроз, з яких ФО – 3, ТФ – 0 та ХФ – 6. Внутрішньомасових випадків виявлено 17. Протягом 2012 року зафіксовано 13 гроз за фронтальним походженням, з яких ФО – 1, ТФ – 0 та ХФ – 12. Внутрішньомасових гроз було виявлено 25. 2013 рік характеризується 10 випадками за фронтальним походженням, з яких ФО – 6, ТФ – 1 та ХФ – 3. Внутрішньомасових гроз було в 2,5 рази більше – 26 випадків. У 2014 році спостерігається 9 випадків фронтальних гроз, з яких ФО – 1, ТФ – 4 та ХФ – 4. Внутрішньомасових гроз було 26. Для 2015 року характерною є кількість 3 випадки за фронтальним походженням, з яких ФО – 1 та ХФ – 2. Внутрішньомасових гроз визначено 14 випадків. У 2016 році було зафіксовано фронтальних 15 випадків, з яких ФО – 10, ТФ – 1 та ХФ – 4. Внутрішньомасових явищ було 10. Протягом 2017 року спостерігається 20 випадків за фронтальним походженням, з яких ФО – 6, ТФ – 2 та ХФ – 10, внутрішньомасовий характер виявлено у 16 гроз. Протягом 2018 року спостерігається 15 випадків фронтального характеру, з яких ФО – 6, ТФ – 4 та ХФ – 5. Внутрішньомасових гроз зафіксовано 18. В 2019 році фронтальних гроз виявлено 11 випадків, з яких ФО – 2, ТФ – 4 та ХФ – 5. Внутрішньомасового походження зафіксовано 14 випадків.

Найбільша кількість гроз має внутрішньомасове походження і складає 370 випадків, фронтальні грози сформувалися у 241 випадку грозової активності за період дослідження. Максимум гроз внутрішньомасового походження виявлено в 2009 році, що становить 33 випадки. Фронтальних явищ найбільшу кількість зафіксовано на холодному фронті з максимумом у 2009 році, що дорівнює 18 випадкам. На фронті оклюзії найбільше значення виявлено в 2016 році –

10 випадків. На теплому фронті за період дослідження найбільша кількість становить 4 грози в 2010, 2014, 2018 та 2019 роках. На рис. 1 представлено розподіл фронтальних гроз на АМСЦ Одеса за період дослідження.

**Фронтальні грози**



**Рис. 1** – Діаграма розподілу фронтальних гроз  
**Fig. 1** – Diagram distribution of frontal thunderstorms

З діаграми видно, що найбільша кількість фронтальних гроз формується на холодному фронті і становить 129 випадків. На фронті оклюзії за період дослідження виявлено 75 гроз. Мінімум епізодів зафіксовано за 20 років на теплому фронті, всього 37 випадків, що становить 15 % від загальної кількості фронтальних гроз.

В табл. 2 представлено добовий хід кількості гроз на АМСЦ Одеса у відповідності до розподілу на загальну кількість і сухі грози. Денні грози визначалися протягом періоду від строку 06 до строку 18 годин, нічні – від 18 до 06 годин. Практично всі досліджувані випадки гроз утворилися в теплий період року за винятком 8 випадків (2 – в березні, 6 – в листопаді). Отримані результати свідчать про те, що в 2000 році добовий хід грозової діяльності був наступним: денних гроз 11 випадків, нічних – 15, з яких 8 – сухих. 2001 рік характеризується наявністю 22 випадків денних гроз: з яких 11 сухих; 13 нічних гроз, з яких сухих – 4 випадки. Протягом 2002 року добовий хід явища має наступний розподіл: денних – 15, з них сухих – 3, нічних – 7, з яких сухих – 3 випадки. В 2003 році виявлено 14 денних гроз, з яких 2 випадки – сухі; нічних гроз зафіксовано 15 випадків, з яких тільки 4 – сухих. У 2004 році денних гроз було виявлено 17 випадків, з них 3 – сухих; нічних гроз визначено тільки 7 гроз, з яких 1 – суха. Добовий хід грозової діяльності з 20 денних і 12 випадками нічних виявлено в 2005 році: сухих денних – 11, нічних сухих – 6 випадків. У 2006 році спостерігається наступний добовий хід гроз на АМСЦ

Одеса: денних всього 15 випадків, з яких 8 – сухих; нічних 11, з яких 4 – сухих. Протягом 2007 року мав місце такий розподіл: денних гроз всього 10, з них сухих – 4; нічних – 15, з яких сухих – 5. У 2008 році відзначається наступний хід гроз: денних всього 33, з яких 11 – сухих; нічних гроз – 9, з яких тільки 3 – сухих. За 2009 рік визначено: денних гроз 28 випадків, з них сухих – 17; нічних – 23, з яких сухих – 9. Наступний 2010 рік характеризується таким розподілом гроз протягом доби: денних – 22, з них сухих – 8, нічних – 13, з них сухих – 3 випадки. У 2011 році зафіксовано наступні данні в добовому ході: денних – 22, з яких 14 випадків – сухі; нічних зафіксовано 4 грози, з них 2 випадки – сухі. Для 2012 року характерною є кількість нічних гроз – 12, з яких сухих відмічається по 6 випадків; денних гроз виявлено 26, з яких 11 випадків – сухих.

**Таблиця 2** – Добовий розподіл кількості гроз  
**Table 2** – Daily distribution of the number of thunderstorms

Вид грози	Денні		Нічні		Всього	
	всього	сухі	всього	сухі	за добу	сухі
2000	11	0	15	8	26	8
2001	22	11	13	4	35	15
2002	15	3	7	3	22	6
2003	14	2	15	4	29	6
2004	17	3	7	1	24	4
2005	20	11	12	6	32	17
2006	15	8	11	4	26	12
2007	10	4	15	5	25	9
2008	33	11	9	3	42	14
2009	28	17	23	9	51	26
2010	22	8	13	3	35	11
2011	22	14	4	2	26	16
2012	26	11	12	6	38	17
2013	28	5	8	0	36	5
2014	18	4	17	2	35	6
2015	14	2	3	0	17	2
2016	15	3	9	2	24	5
2017	17	2	20	0	37	2
2018	29	10	4	2	33	12
2019	17	1	10	1	27	2
Всього	263	130	162	65	425	195

В 2013 році зафіксовано максимум за 20 років в добовому ході, а саме денних – 28 випадків, сухих з них 5, нічних нараховано 8 гроз, сухі грози відсутні. Наступний 2014 рік відрізняється таким добовим розподілом грозової діяльності: денних – 18, з яких сухих – 4 випадки; нічних – 17, з них сухі всього 2 грози. У 2015 році виявлено денних гроз 14, сухі з яких – 2; нічних всього 3, сухі нічні відсутні. В наступному, 2016 році, протягом доби кількість гроз змінювалась таким чином: денних – 15, сухих з них –

Згрози, нічних – 9, сухих з яких – 2 випадки. Протягом 2017 року виявлено максимальну кількість нічних з опадами – 20 випадків, нічні сухі взагалі відсутні. Денних гроз виявлено – 17, з них сухих – 2. У 2018 році був наступний добовий розподіл гроз: денних – 29, сухі з них – 10 випадків; нічних зафіксовано 4 випадки. В 2019 році спостерігається всього денних 17 гроз, з яких тільки 1 випадок без опадів; нічних зафіксовано всього – 10 явищ, з яких 1 гроза суха.

Максимум денних гроз зафіксовано в 2018 році – 33 випадки, а мінімальна кількість – 10 гроз має місце в 2007 році. Денних гроз сухих найбільше спостерігається в 2009 р. – 17 гроз, мінімум – 1 випадок мав місце в 2019 році. Бувають роки, коли денних сухих гроз взагалі не виявлено, як, наприклад, протягом 2000 року. Максимум нічних гроз зафіксовано в 2009 році – 23 випадків, мінімум – 3 грози виявлено в 2015 році. Нічні сухі грози найчастіше за 20 років спостерігаються в 2009 році – 9 випадків. Взагалі відсутні такі грози у 2013, 2015 та 2017 роках.

Протягом періоду дослідження зафіксовано максимум денних та нічних гроз в 2009 році – 51 випадок, а мінімальна кількість – 17 гроз має місце в 2015 році. Максимальна кількість сухих гроз спостерігається в 2009 році і становить 26 випадків, мінімум таких гроз визначено в 2015, 2017 й 2019 роках, їх кількість складає по 2 випадки за рік.

Дослідження добового ходу випадків гроз (рис. 2) свідчить, що максимальна кількість явищ спостерігається в денні години і складає 393 випадки, з яких 130 випадків сухих гроз. Нічні грози становлять 227 випадків, з яких 65 – сухі грози. Необхідно зауважити, що у період 2000-2019 рр. значну кількість складають грози з опадами – 425 випадків, тоді як сухі грози виявлено в 195 випадках, що більш ніж у 2 рази менше, ніж гроз з опадами.

Доволі цікавим є питання утворення гроз протягом дня. На рис. 3 представлено денний розподіл кількості гроз. Загальну вибірку випадків було розділено на кількість гроз за однакові по тривалості періоди від строку 06 до 12 і від 12 до 18 годин. Аналіз результатів показує, що у 2000 році в першій половині дня було зафіксовано 5 випадків, тобто менше, ніж у післяполудневі години, коли виявлено 8 гроз. Протягом 2001 року у денний час спостерігалось 24 грози, з яких 9 випадків визначено у першій половині, а 15 – після 12 години дня. 2002 рік характеризується 7 випадками до 12 години і 12 гроз зафіксовано у другій половині.

## ДОВОБИЙ РОЗПОДІЛ ГРОЗ НА АМСЦ ОДЕСА

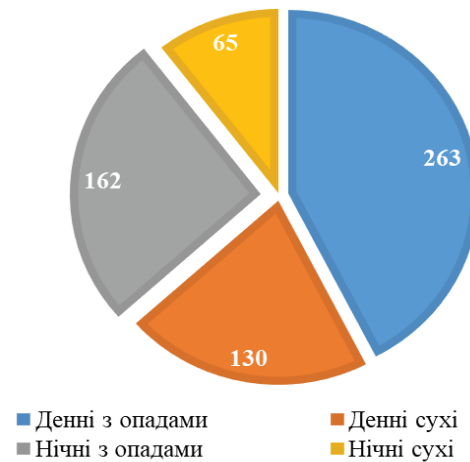


Рис. 2 – Добовий розподіл кількості гроз  
Fig. 2 – Daily distribution of the number of thunderstorms

Найменшою кількістю в першій половині дня відрізняється 2003 рік – 4 випадки, в другій половині дня виявлено 10 гроз. У 2004 році зафіксовано 20 денних гроз, з яких 8 – у першій половині, 12 – до 18 години. 7 випадків в першій половині дня 2005 року, в другій половині в два рази більше – 15 гроз. У 2006 році визначено разом денних гроз 19, з яких 8 – до 12 години, 11 випадків – після 12 години дня. Найменша кількість денних гроз – 12 випадків – спостерігається в 2007 році, з яких в першій половині – 5 гроз, у другій – 7 гроз. У 2008 році до 12 години дня було зафіксовано 9 гроз, що втричі менше, ніж після 12 години, коли виявлено 27 гроз. 12 випадків в першій половині дня спостерігається в 2009 році, що є одним з максимумів для першої половини дня, в другій половині – 17 випадків. В 2010 році 10 гроз відносимо до 12 години дня, а в післяполудневі години зафіксовано 16 випадків. Також 10 гроз в першій половині виявлено і в 2011 році, а після 12 години – 18 випадків. Протягом 2012 року всього денних гроз зафіксовано 29, з яких до 12 години виявлено у 7 випадках, після 12 години – 22 грози. В 2013 році визначено 13 випадків в першій половині дня, що є максимальним значенням, характерним для цього часу, 18 – в другій половині дня. 23 денних грози зафіксовано в 2014 році, з яких 12 випадків до 12 години, 11 – після 12 години. У 2015 році гроз в першій половині дня спостерігається 5 випадків, у другій зафіксовано 10 гроз. 2016 рік характеризується наявністю 8 денних гроз першої половини і 14 виявлено в другій половині дня. Всього 19 гроз в денному ході визначено в 2017 році, з яких 4 – до 12 години і 15 – після 12 години. У 2018 році

було виявлено 11 випадків у першій і 23 грози в другій половині дня. Протягом 2019 року у денному ході зафіксовано 19 випадків, з яких 8 гроз до 12 години дня та 11 випадків після 12 години.

В першій половині дня (від 06 до 12 год) було виявлено 162 грози, в другій половині – 292 випадки. Максимальна кількість денних гроз першої половини дня спостерігається в 2013 році і становить 13 випадків. Мінімум таких гроз зафіксовано в 2017 і 2003 роках і становить 4 грози. В другій половині найбільша кількість була зафіксована в 2008 році, а саме 27 гроз. Найменша кількість спостерігається в 2007 році і дорівнює 7 випадкам.

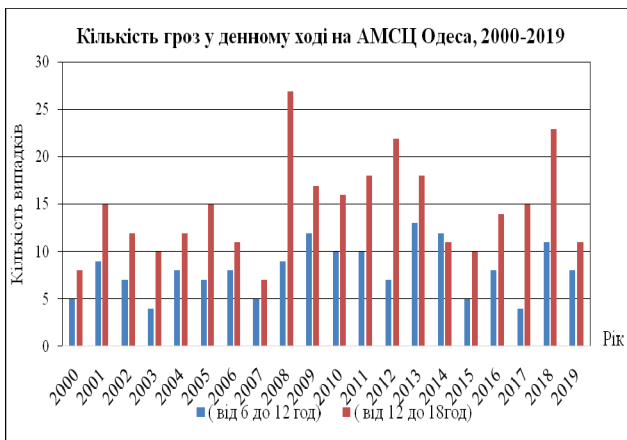


Рис. 3 – Кількість гроз у денному ході

Fig. 3 – Number of thunderstorms during the day

Відомо, що подібний розподіл, коли найактивніша грозова діяльність відбувається в другій половині дня, що пов'язано з більш інтенсивними конвективними процесами в післяполудневі години, стосується внутрішньомасових гроз. Але можна зробити припущення, як видно з рис. 3, така мінливість кількості гроз притаманна для загальної вибірки даного явища.

#### 4. ВИСНОВКИ

Огляд синоптичного матеріалу та опрацювання даних щоденних метеорологічних спостережень за атмосферними явищами дають можливість виявити особливості формування гроз над Одесою за період з 2000 по 2019 роки. Встановлено, що найбільша кількість гроз має внутрішньомасове походження і становить 370 випадків, фронтальні грози сформувалися у 241 випадку грозової активності за період дослідження.

З'ясовано, що максимум фронтальних гроз формується на холодному фронті і становить 129 випадків. На фронті оклюзії виявлено

75 гроз. Мінімум епізодів зафіксовано на теплому фронті, всього 37 випадків, що становить 15 % від загальної кількості фронтальних гроз за 20 років.

Протягом періоду дослідження зафіксовано 620 гроз, з яких сухі грози становлять 195 випадків. У добовому ході більша кількість гроз спостерігається в денні години і складає 393 випадки, з них 130 випадків сухих гроз. Нічні грози становлять 227 випадків, з яких всього 65 – сухі грози. Денна мінливість гроз дає можливість стверджувати, що формування активної грозової діяльності відбувається в другій половині дня, що пов'язано з більш сприятливими умовами для розвитку інтенсивних конвективних процесів.

В статті наведено результати аналізу часового розподілу випадків гроз на АМСЦ Одеса. Отже, в майбутньому, на погляд авторів, слід проаналізувати особливості синоптичних ситуацій, при яких виникають найбільш сприятливі умови утворення гроз, для вдосконалення прогнозу конвективних явищ в регіоні дослідження.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України : монографія / Од. держ. еколог. ун-т; за ред. С. М. Степаненка, А. М. Польового. Одеса : Екологія, 2011. 694 с.
2. Глобальне потепління і клімат України. Регіональні екологічні та соціально-економічні аспекти / Волощук В. М., Бойченко С. Г., Степаненко С. М. та ін. Київ : ВПЦ Київський ун-т, 2002. 116 с.
3. Врублевська О. О., Катеруша Г. П. Клімат України та прикладні аспекти його використання: навч. пос. Одеса : ТЕС, 2012. 180 с.
4. Івус Г. П. Спеціалізовані прогнози погоди: підручник. Одеса, 2010. 407 с.
5. Недострелова Л., Чумаченко В., Недострелов В. Дослідження процесів грозоутворення над Одесою. *International science journal «Polish science journals»*. 2018. Вип. 8. С. 22-27.
6. Недострелова Л. В., Чумаченко В. В., Недострелов В. В. Аналіз часового розподілу кількості випадків гроз на аеродромі Одеса. *Фізична географія та геоморфологія*. 2018. Вип. 1(89). С. 105-109.
7. Чумаченко В. В., Недострелова Л. В. Дослідження грозової діяльності. *Вестник ГМЦ ЧАМ*. 2018. Вип. 1(21). С. 10-20.
8. Мацук Ю. М. Зміни грозової активності на території України в XX та на початку XXI сторіччя. *Вісник Харківського національного університету, №1084, Серія «геологія-географія-екологія»*. 2013. №39. С. 147-151.
9. Заболоцька Т. М., Підгурська В. М., Шпиталь Т. М. Грозова діяльність на території України. *Наукові праці Укр. НДГМІ*. 2007. №256. С. 92-98.
10. Хохлов В. М., Бондаренко В. М., Латиш Л. Г. Просторовий розподіл аномалій опадів в Україні у 2011-2025 роках. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2009. №5. С. 54-62.

11. Хохлов В. Н., Иванов А. В. Количественное описание изменений климата в конце XX – начале XXI века. *Міжвідомчий наук. зб. України: Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. 2008. Ч. 1, №50. С. 221-226.
  12. Хохлов В. М., Латиш Л. Г., Цимбалюк К. С. Возможны зміни температурного режиму в Україні у 2011-2025 роках. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2009. №8. С. 70-78.
  13. Боровская Г. А. Количественные характеристики внутренней структуры АПС для типовых синоптических ситуаций на Украине: Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. Одесса. 1992. 210 с.
- REFERENCES**
1. Stepanenko, S.M., Polovyi, A.M. (eds). (2011). *Otsinka vplyvu klimatychnykh zmin na haluzi ekonomiky Ukrainy [Assessment of the impact of climate change on the economy of Ukraine]*. Odessa State Environmental University. Odessa: Ekolohiia Publ. (in Ukr.)
  2. Voloshchuk, V.M., Boichenko, S.H., Stepanenko, S.M. et al. (2012). *Hlobalne potepplinnia i klimat Ukrainy. Rehionalni ekolohichni ta sotsialno-ekonomichni aspekty [Global warming and climate of Ukraine. Regional environmental and socio-economic aspects]*. Kyiv: VPTs Kyivskiy un-t Publ. (in Ukr.)
  3. Vrublevska, O.O. & Katerusha, H.P. (2012). *Klimat Ukrainy ta prykladni aspekty yoho vykorystannia. [Climate of Ukraine and applied aspects of its use]*. Odessa: TES Publ. (in Ukr.)
  4. Ivus, H.P. (2010). *Spetsializovani prohnozy pohody [Specialized weather forecast]*. Odessa: TES Publ. (in Ukr.)
  5. Nedostrelova, L., Chumachenko, V. & Nedostrelov, V. (2018). Doslidzhennia protsesiv hrozoutvorennia nad Odesoiu [Investigation of thunderstorm processes over Odessa]. *International science journal «Polish science journal»*, 8, pp. 22-27. (in Ukr.)
  6. Nedostrelova, L.V., Chumachenko, V.V. & Nedostrelov, V.V. (2018). Analiz chasovoho rozpodilu kilkosti vypadkiv hroz na aerodromi Odesa [Analysis of temporal distribution of the number of cases of thunderstorms at the Odessa airfield]. *Fizychna heohrafiia ta heomorfolohiia [Physical geography and geomorphology]*, 1(89), pp. 105-109. (in Ukr.)
  7. Chumachenko, V.V. & Nedostrelova, L.V. (2018). Doslidzhennia hrozovoi diialnosti [Investigation of thunderstorm activity]. *Vestnik GMC ChAM [Bulletin of GMTs CHAM]*, 1(21), pp. 10-20. (in Ukr.)
  8. Matsuk, Yu.M. (2013). [Changes in lightning activity on the territory of Ukraine in the XX and the beginning of the XXI century]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu, 1084, Seriya «heolohiia-heohrafiia-ekolohiia» [Bulletin of Kharkiv National University, №1084, Series "geology-geography-ecology"]*, 39, pp. 147-151. (in Ukr.)
  9. Zabolotska, T.M., Pidhurska, V.M. & Shpytal, T.M. (2007). Hrozova diialnist na terytorii Ukrainy [Thunderstorm activity on the territory of Ukraine]. *Naukovi pratsi Ukr. NDHMI [Scientific works Ukr. NDGMI]*, №256, pp. 92-98. (in Ukr.)
  10. Khokhlov, V.M., Bondarenko, V.M. & Latysh, L.H. (2009). [Spatial distribution of precipitation anomalies in Ukraine in 2011-2025]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 5, pp. 54-62. (in Ukr.)
  11. Khokhlov, V.N. & Ivanov, A.V. (2008). [A quantitative description of climate change in the late twentieth and early twentieth centuries]. *Mizhvidomchy nauk. zb. Ukrainy: Meteorolohiia, klimatolohiia ta hidrololohiia [Interdepartmental scientif. works of Ukraine: Meteorology, climatology and hydrology]*, 1(50), pp. 221-226. (in Russ.)
  12. Khokhlov, V.M., Latysh, L.H. & Tsymbaliuk, K.S. (2009). [Possible changes in the temperature regime in Ukraine in 2011-2025]. *Visnyk Odes'kogo derzhavnogo ekolohichnogo universytetu [Bulletin of Odessa state environmental university]*, 8, pp. 70-78. (in Ukr.)
  13. Borovskaya, G. A. (1992). *Kolichestvennye kharakteristiki vnutrenney struktury APS dlya tipovykh sinopticheskikh situatsiy na Ukraine [Quantitative characteristics of the internal structure of atmospheric boundary layer for typical weather situations in Ukraine]*. PhD. Thesis. Odessa. (in Russ.)

## TIME DISTRIBUTION OF THUNDERSTORMS OBSERVED AT ODESA AMSC AT THE BEGINNING OF THE 21ST CENTURY

**L. V. Nedostrelova, V. V. Chumachenko**

*Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, nedostrelova@ukr.net*

The article presents the results of the research of thunderstorm activity at Odesa AMSC for the period of 2000-2019. Under conditions of intense warming, thunderstorm activity responds to the changes of temperature, humidity, radiation regime and atmospheric composition. Modern climate changes that are characterized by rising air temperatures have a decisive influence on the conditions under which dangerous weather phenomena are formed, thus monitoring of the thunderstorms formation in Ukraine is of great importance.

The research includes the analysis of synoptic conditions of thunderstorm activity formation such as air-mass processes, frontal activity, and studies daily and daytime variability of the number of thunderstorm cases for the given period. The results of everyday meteorological observations of atmospheric phenomena conducted by Odesa AMSC within the period of 2000-2019 were used as input data to determine the characteristics of thunderstorm activity over city of Odessa. In order to identify the presence, time and duration of thunderstorm activity aviation weather diaries AV-6 were also reviewed. Certain synoptic materials were used to analyze the types of phenomena. Such materials include interactive database ARMSyn, surface synoptic charts for the periods of

observation before and during the thunderstorms.

It was established that during the period under study air-mass thunderstorms were formed in 370 cases of thunderstorm activity observed at the given observation post. Frontal thunderstorms occur less often: 241 cases over 20 years. The largest number of such thunderstorms is cold front thunderstorms amounting to 129 cases. 75 of them were identified as occlusion front thunderstorms. The least frequent were warm front thunderstorms – only 37 cases constituting 15% of the total number of frontal formations.

During the studied period a total number of 620 thunderstorm cases was recorded, 195 of which are dry thunderstorms. Considerable attention is paid to the daily and daytime variability of thunderstorm cases number recorded by Odesa AMSC. With relation to the daily variation, more thunderstorms are observed during daytime amounting to 393 cases, 130 of which are dry thunderstorms. Night thunderstorms amount to 227 cases, 65 of which are dry thunderstorms. With relation to daytime distribution, more thunderstorms were detected in the afternoon.

**Key words:** thunderstorm activity; climate change; frontal thunderstorms; air-mass thunderstorms; synoptic conditions; daily variation; daytime distribution

## ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГРОЗ НА АМСГ ОДЕССА В НАЧАЛЕ ХХІ СТОЛЕТИЯ

Л. В. Недострелова, В. В. Чумаченко

*Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, nedostrelova@ukr.net*

В статье представлены результаты исследования грозовой деятельности на АМСГ Одесса за период 2000-2019 гг. В условиях интенсивного потепления грозовая активность реагирует на изменения температуры, влажности, радиационного режима и состава атмосферы. Современные климатические изменения, характеризующиеся повышением температуры воздуха, оказывают решающее влияние на условия формирования опасных явлений погоды, поэтому мониторинг образования грозовых явлений на территории Украины является актуальным вопросом.

В работе проведен анализ синоптических условий формирования грозообразований: внутримассовые процессы, фронтальная деятельность, исследованы суточная и дневная изменчивость количества гроз за указанный период. В качестве исходных данных для определения особенностей грозовой деятельности над Одессой были использованы данные ежедневных метеорологических наблюдений за атмосферными явлениями на АМСГ Одесса за период 2000-2019 годы. Были обработаны авиационные дневники погоды АВ-6 для определения наличия, времени и продолжительности грозовой активности. Для анализа типа явления использовался синоптический материал: интерактивная база АРМсин, приземные синоптические карты за сроки наблюдения до и во время грозы.

Установлено, что за период исследования внутримассовые грозы сформировались в 370 случаях грозовой деятельности в пункте наблюдения. Фронтальные грозы образуются реже, в 241 случае за 20 лет. Наибольшее количество таких гроз формируется на холодном фронте и составляет 129 случаев. На фронте окклюзии выявлено 75 гроз. Минимум зафиксировано на теплом фронте, всего 37 случаев, что составляет 15 % от общего количества фронтальных образований.

В течение исследуемого периода зафиксировано 620 случаев гроз, из которых 195 гроз – это сухие грозы. Значительное внимание уделяется суточной и дневной изменчивости количества гроз на АМСГ Одесса. В суточном ходе большее количество гроз наблюдается в дневные часы и составляет 393 случая, из которых 130 случаев сухих гроз. Ночные грозы составляют 227 случаев, из них 65 – сухие грозы. В дневном распределении выявлено большее количество гроз в послеполуденные часы.

**Ключевые слова:** грозовая активность; изменение климата; фронтальные грозы; внутримассовые грозы; синоптические условия; суточный ход; дневной распределение

*Подання до редакції : 27. 05. 2021  
Надходження остаточної версії : 15. 06. 2021  
Публікація статті : 30. 06. 2021*



УДК 621.396.96

## БЮДЖЕТНИЙ ВИМІРЮВАЧ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОГИ В СТОВПІ АТМОСФЕРИ

М. В. Руженцев<sup>1</sup>, С. С. Жила<sup>2</sup>, В. В. Павліков<sup>3</sup>  
В. В. Кошарський<sup>4</sup>, Г. С. Черепнін<sup>5</sup>

Національний аерокосмічний університет ім. М. Е. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»,  
вул. Чкалова, 17, 61000, Харків, Україна,

<sup>1</sup>nvruzh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3023-4927>,  
<sup>2</sup>simeon.zhyla@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2989-8988>,  
<sup>3</sup>v.pavlikov@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0002-6370-1758>,  
<sup>4</sup>v.kosharsky@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8569-2047>,  
<sup>5</sup>g.cherepnin@khai.edu, <https://orcid.org/0000-0003-1245-0933>

Безперервний дистанційний моніторинг фізичних параметрів атмосфери є актуальним завданням при вирішенні питань метеорології, кліматології, штучного впливу на хмари, при дослідженнях фізики хмарного покриву тощо. У розвинених країнах світу для вирішення цих питань прийнято використовувати наукомісткі технології радіометрії міліметрового діапазону хвиль (ММ ДХ). Вони дозволяють, зокрема, оперативно відновлювати значення загального вмісту і ефективної температури крапельної і пароподібної вологи в атмосферному стовпі, розрізняти області з кристалічною, крапельною або пароподібною фазами води.

У даній роботі розрахунковим і експериментальним шляхом обґрунтована можливість широкомасштабного вирішення завдань безперервного дистанційного моніторингу цих параметрів атмосферної вологи методом радіометрії сантиметрового діапазону хвиль (СМ ДХ). Для визначення кращої пари частот для відновлення параметрів атмосферної вологи по радіометричним даним дистанційного зондування були розраховані коефіцієнти лінійного поглинання для ясної атмосфери, для хмар в залежності від температури крапель і в дощах різної інтенсивності для частот 4, 12, 20, 40 і 94 ГГц. Для розрахунку цих даних нами використовувалась відома модель MPM (Atmospheric Millimeter Waves Propagation Model). При цьому, розрахунок висотних профілів метеорологічних параметрів атмосфери був проведений на основі моделі ERA-15.

Можливість вирішення зазначених вище завдань в СМ ДХ була показана шляхом зіставлення отриманих розрахунковим шляхом даних з урахуванням прогресу технічних параметрів серійної елементної бази. Представлено опис схемних і технічних рішень, а також зовнішній вигляд двочастотної радіометричної системи діапазону 1,5 см і 2,5 см, створеної в Національному аерокосмічному університеті (ХАІ) на основі легко доступної сучасної елементної бази та результатів натурних тестових випробувань. Бюджетна направленість описаної розробки дозволяє забезпечити радіофізичні вимірювання з чутливістю радіометрів краще 0.01 К при забезпеченні собівартості дрібносерійного виробництва радіотехнічної частини системи, порівнянної з вартістю широко поширених в побуті ТВ конверторів.

**Ключові слова:** радіояскравісна температура; радіометр; чутливість; діапазон хвиль

### 1. ВСТУП

Безперервний дистанційний моніторинг фізичних параметрів атмосфери є актуальним завданням при вирішенні питань метеорології, кліматології, штучного впливу на хмари, при дослідженнях фізики хмарного покриву та ін. В розвинених країнах світу для вирішення цих питань прийнято використовувати наукомісткі

технології радіометрії ММ ДХ. Вони дозволяють оперативно відновлювати значення висотних профілів температури, загального змісту і ефективної температури крапельної і пароподібної вологи в атмосферному стовпі, розрізняти області з кристалічною, крапельною або пароподібною фазами вологи тощо. [1-5].

Вперше в Україні цикл двочастотних радіо-

метричних спостережень проходження декількох фронтальних зон хмарності був проведений спільно співробітниками РІНАНУ і УкрНДГМІ в селищі Жовтневому ще в 1993 році [6] в діапазонах 94 ГГц і 39 ГГц. Результати цього та інших [5,7] проведених в Харкові натурних експериментів продемонстрували практичні можливості та ефективність методу радіометрії ММ ДХ для безперервного моніторингу параметрів атмосферної вологи. Однак, економічна ситуація в країні, разом з відносно високою вартістю використовуваної для цих цілей апаратури ММ ДХ, не дозволили забезпечити впровадження даного ефективного методу в повсякденну практику, зокрема, в розгалуженій мережі станцій Українського гідрометеорологічного центру.

Дане дослідження виконувалося з метою обґрунтування розрахунковим шляхом можливості вирішення згаданих вище завдань методом радіометрії сантиметрового ДХ з урахуванням спостережуваного прогресу на сучасному етапі розвитку широкомасштабного промислового виробництва високочутливих приймальних пристроїв. Авторами представлено опис схемних і технічних рішень, а також зовнішній вигляд, створеної в ХАІ двочастотної радіометричної системи діапазону 1,5 см і 2,5 см. Основною перевагою описаної розробки є її бюджетна направленість, що дозволяє забезпечити високу флукуаційну чутливість радіометрів (краще 0,1-0,01 К) поряд з вкрай низькою собівартістю їх дрібносерійного виготовлення.

## 2. АПАРАТУРНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТОДУ РАДІОМЕТРІЇ І РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКОВИХ ОЦІНОК

Апаратно-методичне забезпечення методу радіометрії дає можливість отримувати дані про радіояскравісну температуру ( $T_b$ ) атмосфери і потім відновлювати значення оптичної товщини атмосфери ( $\tau$ ) і повного вертикального поглинання радіохвиль. Обидві ці величини  $T_b$  і  $\tau$  пов'язані добре відомим виразом для низхідного радіотеплового випромінювання атмосфери:

$$T_b = T_{eff}(1 - e^{-\tau \sec \theta}), \quad (1)$$

де  $T_{eff}$  – це ефективна температура атмосфери,  $\theta$  – зенітний кут візування антени радіометра.

Знання величини повного вертикального поглинання радіохвиль на різних частотах дозволяє визначати різноманітні фізичні параметри атмосфери і деяких її складових [1,5]. Методи відно-

влення фізичних параметрів атмосфери за даними радіометрії в ММ ДХ досить добре розвинені і знайшли широке практичне застосування в світі за останні кілька десятиліть. На рис. 1 як приклад показаний фрагмент запису зміни радіояскравісної температури неба ( $T_b$ ) в двох точках ММ ДХ (3 мм і 8 мм ДХ) при проходженні фронтальної зони хмарності над Харковом і результат синхронного відновлення значень ефективної температури ( $T$ ) хмарного шару.

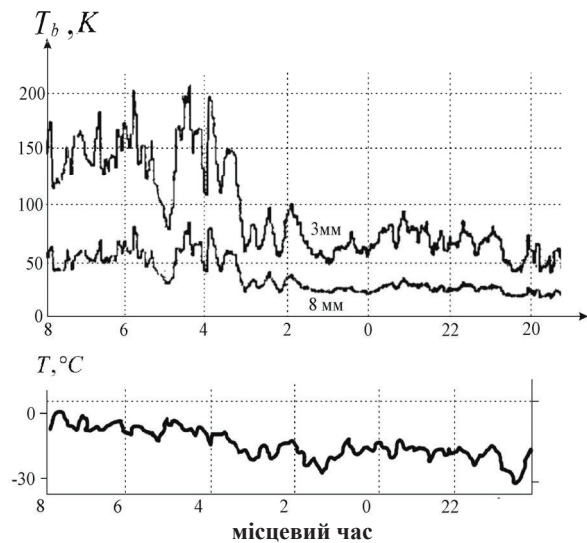


Рис.1 – Фрагмент запису зміни радіояскравісної температури неба ( $T_b$ ) в 3 мм і 8 мм ДХ а) і відновлені значення ефективної температури хмарного шару ( $T$ ) [5]

Fig. 1 – Fragment of recording of change of radio brightness temperature of the sky ( $T_b$ ) in 3 mm and 8 mm wave range and the restored values of effective temperature of a cloud layer ( $T$ ) [5]

Ряд нових технологічних можливостей у розвитку апаратного забезпечення радіометричних спостережень, що з'явився в останні роки, обумовлює можливість проведення деякого додаткового і повторного аналізу ситуації з метою техніко-економічної оптимізації апаратно-методичного забезпечення методу радіометрії.

Застосування останніх досягнень промислової електроніки дозволяє за допомогою широкодіапазонних елементів НВЧ техніки забезпечити чутливість радіометрів СМ ДХ в тисячні частки градуса Кельвіна (К). Ця обставина може зробити конкурентоспроможним широкомасштабне застосування змін радіометричних систем СМ ДХ по відношенню до їх аналогів в ММ ДХ, які вже добре зарекомендували себе на практиці. Широкомасштабне застосування таких систем в розгалужених мережах станцій Українського

гідрометеорологічного центру здатне сьогодні забезпечити безперервний контроль параметрів водності атмосфери в автономному режимі з передачею отриманих даних через Інтернет.

Процедура визначення фізичних параметрів

$$T_a = T_{eff}(1 - e^{\tau \sec \theta})(1 - \beta)\mu + T_{bgr}\beta\mu + 2.7e^{-\tau \sec \theta}(1 - \beta)\mu + T_o(1 - \mu). \quad (2)$$

де  $T_{bgr}$  – усереднена величина радіояскравісної температури фону, що приймається поза основною пелюсткою діаграми спрямованості (ДС) антени радіометра,  $\beta$  – коефіцієнт розсіювання поза основною пелюсткою ДС антени,  $\mu$  – к.к.д. антени.

б) визначення радіояскравісної температури атмосфери  $T_b$  в напрямку головної пелюстки ДС антени по вимірним значенням  $T_a$  з урахуванням вирізів (1) і (2);

в) визначення значень  $\tau$  (непер) та повного вертикального ослаблення (дБ) на основі даних про  $T_b$ .

При вирішенні завдань ДЗ дані про значення  $\tau$  (Непер) і  $\alpha$  (дБ) = 4.343 $\tau$  на різних частотах необхідні для вирішення системи рівнянь:

$$\alpha_{total}^{\lambda_i} = \alpha_{oxygen}^{\lambda_i} + \Phi_{\lambda_i}Q + k_{\lambda_i}(T_0)W, \quad (3)$$

де  $i$  – номер частотного діапазону,  $Q$  – відновлюване значення водозапасу атмосфери (пароподібна волога),  $W$  – відновлюване значення водозапасу атмосфери (крапельна волога)  $\Phi_{\lambda_i}$  і  $k_{\lambda_i}(T_0)$  – коефіцієнти питомого поглинання в пароподібній і крапельній волозі атмосфери відповідно.

Зрозуміло, що рішення таких систем рівнянь з двома змінними  $Q$  і  $W$  є більш прийнятним для випадків суттєвої різниці використовуваних частот, одна з яких більше схильна до впливу пароподібної вологи, а інша – впливу крапельної вологи атмосфери.

Для визначення найкращої пари частот для таких додатків ДЗ нами були розраховані [8] коефіцієнти лінійного поглинання в хмарах в залежності від їх температури для частот 4, 12, 20, 40 і 94 ГГц. Для розрахунку цих даних нами використовувалася відома модель MPM (Atmospheric Millimeter Waves Propagation Model) [9].

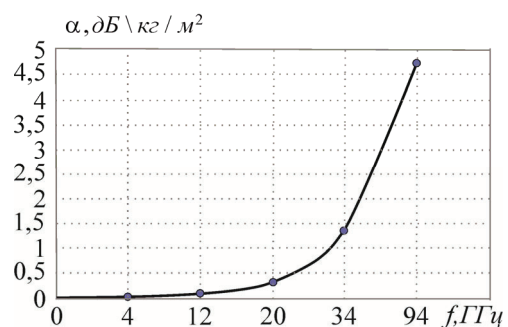
Частоти 40 і 94 ГГц вважаються традиційними в задачах ДЗ атмосфери. Включення в розгляд частот 4, 12, 20 ГГц пов'язано з розглядом можли-

вості побудови в цих діапазонах високочутливих і в той же час високобюджетних радіометрів, а також для аналізу їх придатності в задачах ДЗ. Наші розрахункові оцінки показали, що використання схем і елементів сучасних промислових приймачів супутникових телевізійних сигналів з показником шуму менше 1 дБ забезпечує принципову можливість для досягнення флуктуаційної чутливості радіометра в кілька тисячних часток К.

а) вимірювання антеною температури радіометра, яку можна представити як:

вості побудови в цих діапазонах високочутливих і в той же час високобюджетних радіометрів, а також для аналізу їх придатності в задачах ДЗ. Наші розрахункові оцінки показали, що використання схем і елементів сучасних промислових приймачів супутникових телевізійних сигналів з показником шуму менше 1 дБ забезпечує принципову можливість для досягнення флуктуаційної чутливості радіометра в кілька тисячних часток К.

На рис. 2 представлена залежність коефіцієнта питомого ослаблення  $\alpha$  (дБ/кг/м<sup>2</sup>) в хмарних краплях при температурі крапель 0 °С від частоти  $f$ .

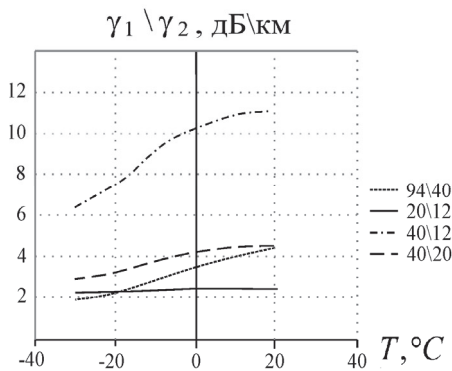


**Рис.2** – Коефіцієнт питомого ослаблення в хмарних краплях  $\alpha$  (дБ/кг/м<sup>2</sup>) в залежності від частоти  $f$  (4 ГГц, 12 ГГц, 20 ГГц, 40 ГГц і 94 ГГц) при температурі крапель 0 °С  
**Fig. 2** – Specific attenuation coefficient in cloud droplets  $\alpha$  (dB \ kg / m<sup>2</sup>) as a function of frequency  $f$  (4 GHz, 12 GHz, 20 GHz, 40 GHz and 94 GHz) at a droplet temperature of 0 °C

Аналіз отриманих розрахунковим шляхом даних показав [8], що найбільш чутливим до зміни водозапасу хмарного покриву є радіометри діапазону 94 ГГц. При цьому, реакція радіометра діапазону 4 ГГц на зміни водозапасу хмар буде більш ніж на два порядки меншою, ніж в діапазоні 94 ГГц. Ця обставина змушує виключити можливість застосування С ДХ з подальшого розгляду в якості одного з робочих каналів. Реакція радіометра діапазону 12 ГГц на крапельну вологу хмар приблизно в 30 разів відрізняється від радіометрів, що працюють в діапазоні 94 ГГц. Однак, на наш погляд, використання діапазону 12 ГГц може бути конкурентоспроможним, оскільки в ньому є мож-

ливість відносно легко реалізувати приблизно в 10-30 разів більшу чутливість. Істотним, при практичній реалізації такого рішення, є також його бюджетний вигравш, що досягає декількох порядків в порівнянні з частотним діапазоном 94 ГГц. Радіометри, побудовані в інших розглянутих нами ДХ, будуть мати проміжні показники по комплексу розглянутих параметрів вартості, чутливості і реакції на зміну атмосферної крапельної вологи.

На рис. 3 наведені, отримані в роботі розрахункові значення (в разях), співвідношення між вираженими в дБ/км величинами погонного поглинання хмар  $\gamma_1 \setminus \gamma_2$  від температури крапель для різних пар частот.



**Рис.3** – Значення співвідношень (в разях) між величинами питомого поглинання в хмарах  $\gamma_1 \setminus \gamma_2$  (дБ / км) для різних пар частот в залежності від температури крапель ( $T$ )  
**Fig. 3** – The value of the ratios (in times) between the values of specific absorption in the clouds  $\gamma_1 \setminus \gamma_2$  (dB / km) for different frequency pairs depending on the temperature of the drops ( $T$ )

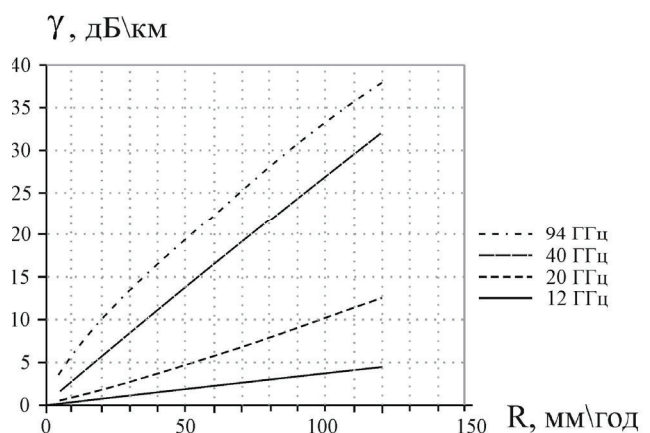
Звертає на себе увагу те, що температурна залежність коефіцієнтів погонного поглинання в краплях води досить істотна для всіх розглянутих частот, за винятком 94 ГГц. Ця обставина вказує на необхідність досить точного знання ефективної температури хмарного покриву при вирішенні задач відновлення процесів відновлення його водозапасу по радіометричним даним.

З результатів наших попередніх оцінок також випливає, що якщо для пар частот 40\12 ГГц, 94\12 ГГц і 94\40 ГГц така залежність яскраво виражена, то для пари частот 20\12 ГГц температурна залежність в розглянутих співвідношеннях відсутня. Ця виявлена закономірність практично важлива, оскільки дозволяє відновлювати значення водозапасу хмар в умовах відсутності даних про їх ефективну температуру по радіометричним даним 2-х каналів – 20 ГГц і 12 ГГц.

З урахуванням проведеного розгляду, а також наявності багаторазових відмінностей у впливі

пароподібної вологи на величину власного випромінювання нами була обрана пара частот 12 ГГц і 20 ГГц для реалізації вимірювальної системи, призначеної для дистанційного моніторингу атмосферної вологи.

Крім ясної чи хмарної атмосфери, в практиці дистанційного зондування, а також в сучасних і перспективних системах зв'язку, важливу і вимагаючу обліку роль відіграють дощі [10-11]. Результати визначення залежності атмосферного питомого ослаблення в дощі ( $\gamma$ ) від інтенсивності дощу ( $R$ ) для виділених вище п'яти частот, були проведені нами за допомогою моделі Лііба [9] (Рис.4).



**Рис.4** – Коефіцієнт питомого ослаблення в дощі  $\gamma$  (дБ / км) в залежності від його інтенсивності ( $R$ ) для частот 12, 20, 40 і 94 ГГц  
**Fig. 4** – The coefficient of specific attenuation in the rain  $\gamma$  (dB / km) depending on its intensity ( $R$ ) for the frequencies 12, 20, 40 and 94 GHz

Отримані дані вказують на безперспективність використання С ДХ (4 ГГц) через дуже мало впливу крапельної вологи на величину погонного поглинання атмосферою в цьому ДХ і підтверджують хороші перспективи застосування пари частот 12\20ГГц для дистанційного моніторингу параметрів дощів і хмар методом радіометрії.

З графіка також видно, що кратність збільшення атмосферного загасання, викликаного зростанням інтенсивності дощу в СМ ДХ в 2-3 рази вище, ніж спостережуване зростання цього параметра в ММ ДХ. При цьому абсолютні значення погонного поглинання в діапазоні 20 ГГц можна вважати цілком прийнятними для їх вимірювання радіометричним методом і для подальшого відновлення висоти дощового шару за даними трьохчастотних вимірювань (наприклад, на частотах 12ГГц, 20ГГц з додатковим каналом 34 ГГц. Введення третього додаткового каналу

може розширити можливості атмосферного моніторингу, забезпечивши відновлення такого додаткового параметра, як висота дощового шару.

### 3. СХЕМНЕ РІШЕННЯ

Потенційну флуктуаційну чутливість радіометра можна представити у вигляді:

$$\delta T = kT_{ш} \sqrt{1/\tau \Delta\Phi}, \quad (4)$$

де  $T_{ш}$  – шумова температура радіометра,  $\Delta\Phi$  – частотна смуга пропускання,  $\tau$  – постійна інтеграції радіометра,  $k$  – коефіцієнт, який враховує схемну будову радіометра (зазвичай змінюється від 1 до 3).

Приймальні системи радіометрів зазвичай прийнято будувати, використовуючи схеми прямого посилення, або супергетеродинні схеми, схеми повної потужності або модуляційні схеми.

Схеми прямого посилення забезпечують більшу смугу пропускання, а значить підвищену чутливість, що особливо важливо в задачах радіобачення. У завданнях ДЗ атмосфери надмірно широка смуга прийому (вище декількох ГГц) може погіршити точність відновлення фізичних параметрів атмосфери, через частотну залежність інтенсивності її випромінювання. Тому нами була обрана для реалізації схема радіометра з приймачем супергетеродинного типу.

Незважаючи на те, що потенційно досяжна чутливість у радіометрів повної потужності вдвічі краща, ніж у радіометрів модуляційного типу, все ж до останнього часу найбільш широке застосування знаходили саме радіометри модуляційного типу. Такі схеми дозволяли компенсувати негативний вплив нестабільності коефіцієнта передачі трактів на чутливість радіометра. До додаткових недоліків класичної схеми найбільш поширеного модуляційного типу радіометрів можна також віднести наявність модулятора, що приводить до втрат половини потужності корисного сигналу і який має власні шуми і втрати, наявність розв'язуючого вентиля, що вносить додаткові втрати і шум, а також розташування АЦП в кінці тракту радіометра.

При проектуванні і побудові сучасних радіометрів має сенс звертати увагу на останні досягнення в області схемотехнічних і технологічних рішень радіоелектроніки, які спрямовані на стабілізацію коефіцієнта підсилення і зсувів нульового рівня приймальних пристроїв. Адже при прийнятних значеннях цих параметрів в практично реалізованих схемах з'являється можливість спростити схему радіометра, перейшовши до реалізації радіометра повної потужності. Така спроба була нами зроблена в цій роботі. Крім того, останні досягнення радіоелектроніки, які засновані на використанні арсенід-галієвих технологій дозволили створити недорогі надмалощумлячі транзисторні підсилювачі з шумовими температурами всього лише в кілька десятків К аж до  $Ku$  діапазону хвиль [12]. Такий стан справ визначає доцільність використання МШП шляхом його розміщення у вхідних ланцюгах будь-якої схеми радіометра.

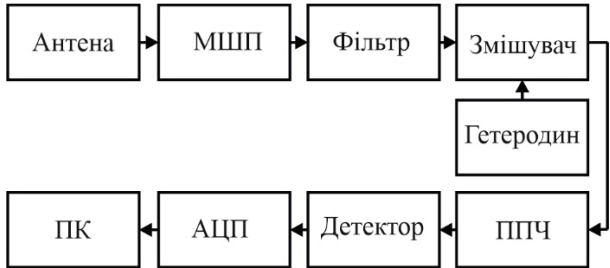
Застосування цифрових методів післядетекторної обробки дозволяє зменшувати в рази похибки вимірювання шумової температури, що викликані дрейфом вихідного нульового рівня СВЧ-радіометра, нелінійністю, температурною і часовою нестабільністю коефіцієнта передачі приймального тракту радіометра [13-14].

Застосування гнучких алгоритмів цифрової попередньої обробки особливо актуально в бортових скануючих радіометричних системах, де час переміщення променя на величину ширини діаграми спрямованості (ДС) становить одиниці мілісекунд. У них використання звичайних аналогових вузькосмугових фільтрів і синхронних детекторів з фіксованою не оптимально великою постійною часу призведе до додаткових помилок вимірювання швидко змінної на виході антени шумової температури і зниження просторового дозволу. При занадто малих значеннях постійної часу інтегрування не виправдано знижується чутливість радіометра.

Спільний аналіз такої класичної схеми побудови та сучасного стану елементної бази показує можливість створення в діапазоні хвиль вище 1 см високочутливих радіометричних систем повної потужності на основі промислових ТВ конверторів, шумові температури яких знаходяться в межах декількох десятків К. Такий низький рівень шуму приймачів потенційно дозволяє забезпечити чутливість радіометрів в тисячні частки К. Використовувані в них схемні і конструктивні рішення спрямовані на зниження впливу флуктуацій температури на коефіцієнт передачі тракту також дозволяє сподіватися на можливість реалізації схеми повної потужності і зниження ефектів плаваючого нуля. А додаткове використання прийомів термостабілізації приймачів має забезпечити більш повну реалізацію потенційних можливостей таких радіометрів.

Цей підхід був покладений нами в основу побудови двочастотної радіометричної системи діапазону 12\20 ГГц. В основі представленої на

рис. 5 схеми побудови обох радіометрів були використані елементи схем побутових ТВ конверторів з лінійною (12 ГГц) і круговою (20 ГГц) поляризацією, відповідно китайських і ірландських виробників.



**Рис.5** – Схема побудови радіометрів діапазону 12ГГц і 20ГГц  
**Fig. 5** – The scheme of construction of radiometers in the range of 12GHz and 20GHz

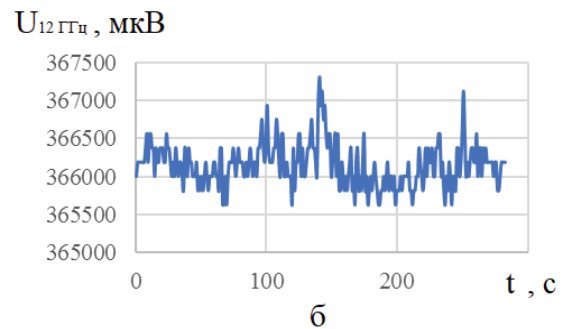
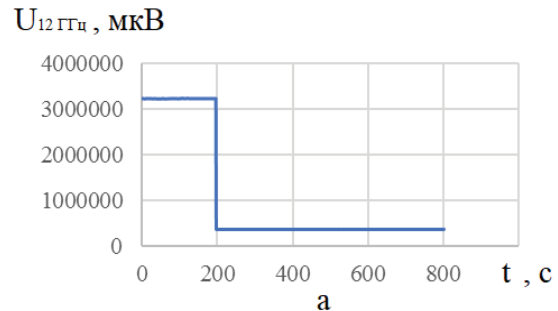


**Рис.6** – Зовнішній вигляд побудованої в ХАІ радіометричної системи діапазонів 12 ГГц і 20 ГГц (верхня антена)  
**Fig. 6** – Appearance of the 12 GHz and 20 GHz (upper antenna) radiometric system built in KNAI

На рис. 6 показаний зовнішній вигляд розробленого блоку радіометрів діапазону 12 ГГц і 20 ГГц. На рис. 7 показані фрагменти запису вихідного сигналу радіометра  $U$  (мкВ) для рівня, прийнятого від узгодженого навантаження, сигналу (відліки 0-200) і сигналу від неба (відліки 200-800) в процесі калібрування радіометра діапазону 12 ГГц (а), а також збільшений масштаб фрагмента запису шумової доріжки сигналу від зенітного напрямку неба (б). Аналогічні приклади фрагментів записів, отриманих в діапазоні 20 ГГц (відліки сигналу 0-33 отримані від узгодженого навантаження, а відліки сигналу  $U$  (мкВ) 35-60 від зенітної області неба) представлені на рис.8.

Виміряна в лабораторії чутливість радіометра діапазону 12 ГГц склала 0.022К, радіометра діапазону 20 ГГц – 0.12К [14], що є цілком прийнятним результатом для практичних застосувань в задачах ДЗ атмосфери. При цьому корисно мати на увазі, що оцінена за формулою 4 (для парамет-

рів елементів схеми, використаних при побудові радіометрів) потенційно досяжна чутливість радіометра в кілька разів краща реально вимірюваної нами.

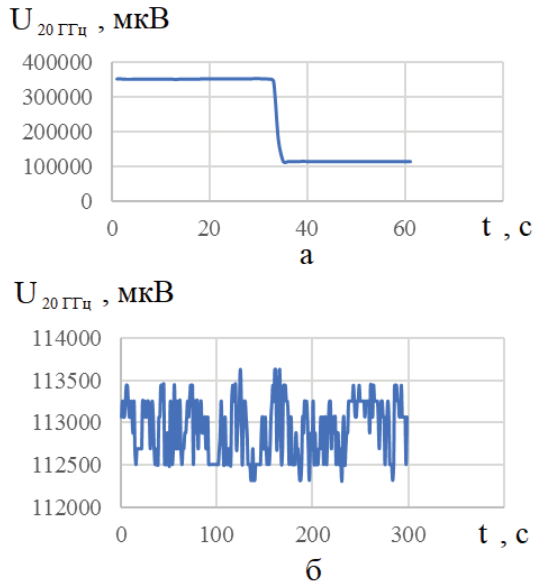


**Рис.7** – Фрагменти запису вихідного рівня сигналу  $U$  (мкВ) в процесі калібрування радіометра діапазону 12 ГГц (а) і сигналу  $U$  (мкВ) від зенітного напрямку неба (б)  
**Fig. 7** – Fragments of recording the output level of the signal  $U$  ( $\mu\text{V}$ ) during the calibration of the radiometer in the range of 12 GHz (а) and the signal  $U$  ( $\mu\text{V}$ ) from the zenith direction of the sky (б)

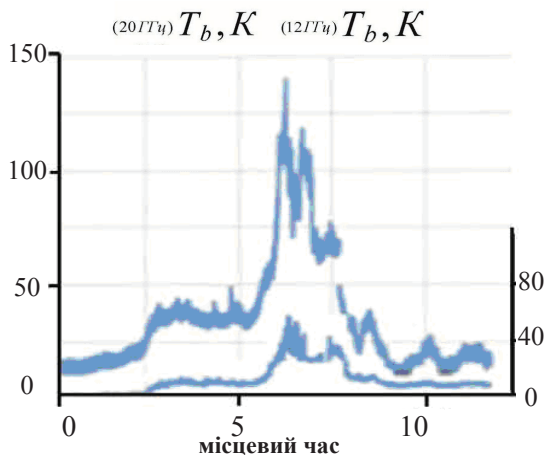
Ця обставина, дозволяє розраховувати, в разі необхідності, на потенційну можливість досягнення ще кращих практичних результатів шляхом прийняття спеціальних заходів по термостабілізації побудованих радіометрів і за рахунок використання спеціальних гнучких процедур і алгоритмів обробки сигналів. Такі заходи, ймовірно, дозволять знизити негативний вплив часових перепадів температури на стабільність підсилення і часовий «дрейф нуля».

На рис. 9 показаний приклад практичного застосування розробленого двочастотного блоку радіометра. Представлені на рисунку результати вимірювання інтенсивності радіотеплового випромінювання атмосфери в напрямку 60 кутових градусів від зеніту були отримані над Харковом 26 січня 2021 року протягом півдоби в автоматичному режимі. Добре видно варіації вихідних сигналів радіометрів, викликані варіаціями загального вмісту рідкокрапельної і пароподібної атмосферної вологи при проходженні невеликого теплового атмосферного фронту над вимірювальним пунктом. Така яскраво виражена в обох ка-

налах радіометрів діапазону 12 ГГц і 20 ГГц реакція на загальний вміст атмосферної вологи дає можливість визначення в реальному масштабі часу значень водо- і волого запасу хмарного покриву.



**Рис.8** – Фрагменти запису вихідного рівня сигналу  $U$  (мкВ) в процесі калібрування радіометра діапазону 20 ГГц (а) і сигналу  $U$  (мкВ) від зенітного напрямку неба (б)  
**Fig. 8** – Fragments of recording the output level of the signal  $U$  ( $\mu$ V) during the calibration of the radiometer in the range of 20 GHz (a) and the signal  $U$  ( $\mu$ V) from the zenith direction of the sky (b)



**Рис.9** – Фрагмент запису радіояркістних температур атмосфери ( $T_b$ ) радіометрами діапазону 12 ГГц (нижня крива) і 20 ГГц (верхня крива) в процесі проходження фронтальної зони хмарності (ніч-ранок 26.01.2021) над вимірювальним пунктом  
**Fig. 9** – A fragment of the recording of radio brightness atmospheric temperatures ( $T_b$ ) by radiometers in the range of 12 GHz (lower curve) and 20 GHz (upper curve) in the process of passing the frontal cloud zone (night-morning 26.01.2021) above the measuring point

#### 4. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень обґрунтована можливість широкомасштабного вирішення актуальних для метеорології завдань безперервного моніторингу параметрів атмосферної вологи методом радіометрії сантиметрового ДХ на території України. Представлено опис схемних і технічних рішень, а також зовнішній вигляд двочастотної радіометричної системи діапазону 1,5 см і 2,5 см, створеної в ХАІ на основі легко доступної сучасної елементної бази. Показана бюджетна спрямованість розробки, що потенційно дозволяє забезпечити чутливість радіометрів краще 0.01К при забезпеченні собівартості дрібносерійного виробництва радіотехнічної частини співставною з вартістю ТВ конверторів, що широко розповсюджені в побуті.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Радиолокация и метеорология / Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. Ленинград : Гидрометиздат, 1987. 283 с.
2. Microwave radiometric technique to retrieve vapor, liquid and ice. Part I. Development of a Neural Network-Based Inversion Method / Li L. et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1997. 35. Pp. 224-236.
3. On the use of ground-based multi-frequency microwave radiometry for precipitation and radio-propagation parameter retrieval / Marzano F. S. et al. *Atti Fond. G. Ronchi*. 2001. 56. Pp. 1027-1037
4. Löhnert U., Crewell S. Accuracy of cloud liquid water path from ground-based microwave radiometry. Part I. Dependency on Cloud model statistics. *Radio Science*. 2003. 38(3). Art. no 8041
5. Ruzhentsev N. V. Peculiarities of vertical atmosphere absorption in the millimeter wave band. *Radio Science*. 2003. 38. Pp. 8-1 – 8-7
6. Ruzhentsev N. V., Kuzmenko Yu. A., Bakhanov V. P. Monitoring of atmospheric moisture and water content by the method of two-frequency radiometer of mm-waveband. *Proc. of the URSI Commission – F Triennial Open Symposium "Wave Propagation and Remote Sensing"*, 20-24 November. Ahmadabad, India, 1995. Pp. 123-126
7. Ruzhentsev N. V. The peculiarities of vertical atmosphere absorption from radiometer data at millimeter waves band. *Abstracts of Int. Specialist Meeting on Microwave Remote Sensing*, NOAA, 5-9 November. Boulder, Colorado USA, 2001. Pp. 101-102.
8. Аппаратурно-методическое обеспечение научно-прикладной радиометрии атмосферы / Волосюк В. К., Жила С. С., Собколов А. Д. и др. *Радиотехника. Всеукраїнський міжведомственный науково-технічний збірник*. 2019. Вып. 196. С. 5-21. ISSN

0485-8972

9. Liebe H. J. MPM — an atmospheric millimeter waves propagation model. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1989. 10(6). Pp. 631-650.
10. Peculiarities of Microwaves Attenuation Statistics for Ukrainian Region / Merzlikin A. A., Pavlikov V. V., Ruzhentsev N. V. et al. *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 21-25 September. Kharkiv, Ukraine. 2020. Pp.761-764.
11. Визначення характеристик готовності та пропускної здатності каналів зв'язку міліметрового діапазону хвиль / Мерзликін А. А., Сальников Д. С., Битченко А. Н. и др. *Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник "радіотехніка"*. 2019. 4(199). С. 45-53.
12. UAV Target Detection Using Radiometers of X, K, Ka and W bands / Ruzhentsev N. V. et al. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2020. 79(17). Pp. 1489-1512.
13. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмповский В. Г. Система мониторинга тропосферных параметров на основе радиометра водяного пара. *Труды ИПА РАН*. 2013. Вып. 27. С. 204–209.
14. Шум вида 1/f в радиометре полной мощности / Цыбулев П. Г., Дугин М. В., Берлин А. Б. и др. *Астрофизический бюллетень*. 2014. 69(2). С. 256-262.
7. Ruzhentsev, N.V. (2001). The peculiarities of vertical atmosphere absorption from radiometer data at millimeter waves band. *Abstracts of Int. Specialist Meeting on Microwave Remote Sensing*, NOAA, 5-9 November. Boulder, Colorado USA, pp 101-102.
8. Volosyuk, V.K., Zhila, S.S., Sobkolov, A.D. et al. (2019). Apparatusno-metodicheskoe obespechenie nauchno-prikladnoy radiometrii atmosfery [Hardware and Methodological Support of Scientific and Applied Radiometry of the Atmosphere]. *Radiotekhnika. Vseukrainskiy mezhvidomstvennyy nauchno-tehnicheskii sbornik [Radiotechnique. All-Ukrainian interdepartment scientific and technical collection]*, 196, pp. 5-21. (in Russ).
9. Liebe, H.J. (1989). MPM — an atmospheric millimeter waves propagation model. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 10(6), pp. 631-650.
10. Merzlikin, A.A., Pavlikov, V.V., Ruzhentsev N.V. et al. (2020). Peculiarities of Microwaves Attenuation Statistics for Ukrainian Region. *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW)*, 21-25 September. Kharkiv, Ukraine, pp.761-764
11. Merzlikin, A.A., Sal'nikov, D.S., Bitchenko, A.N. et al. (2019). Vyznachennia kharakterystyk hotovnosti ta propusknoi zdatnosti kanaliv zviazku milimetrovoho diapazonu khvyl [Determining the characteristics of readiness and bandwidth of communication channels of the millimeter wave range]. *Vseukrainskiy mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk "Radiotekhnika" [All-ukrainian interdepartment scientific and technical journal "Radiotekhnika"]*, 4(199), pp. 45-53 (in Ukr).
12. Ruzhentsev, N.V., Volosyuk, V.K., Pavlikov, V.V. et al. (2020). UAV target detection using radiometers of X, K, Ka and W bands. *Telecommunications and Radio Engineering*, 79(17), pp 1489-1512.
13. Il'in, G.N., Bykov, V.Yu. & Stempkovskiy, V.G. (2013). Sistema monitoringa troposfernykh parametrov na osnove radiometra vodyanogo para [Tropospheric monitoring system based on water vapor radiometer]. *Trudy IPA RAN [Proceedings of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences]*, 27, pp 204–209. (in Russ).
14. Cybulev, P.G., Dugin, M.V., Berlin A.B. et al. (2014). Shum vida 1/f v radiometre polnoy moshchnosti [1 / f noise in full power radiometer]. *Astrofizicheskiy byulleten' [Astrophysical Bulletin]*, 69(2), pp. 256-262. (in Russ).

## REFERENCES

1. Stepanenko, V.D. et al. (1987). *Radiolokatsiya i meteorologiya [Radar and meteorology]*. Leningrad : Gidrometizdat. (in Russ).
2. Li, L. et al. (1997). Microwave radiometric technique to retrieve vapor, liquid and ice. Part I. Development of a neural network-based inversion method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, pp. 224-236.
3. Marzano, F.S. et al. (2001). On the use of ground-based multi-frequency microwave radiometry for precipitation and radio-propagation parameter retrieval. *Atti Fond. G. Ronchi*, 56, pp. 1027-1037.
4. Löhnert, U & Crewell, S. (2003). Accuracy of cloud liquid water path from ground-based microwave radiometry. Part I. Dependency on Cloud model statistics. *Radio Science*, 38(3), art. no 8041.
5. Ruzhentsev, N.V. (2003). Peculiarities of vertical atmosphere absorption in the millimeter wave band. *Radio Science*, 38, pp. 8-1 – 8-7.
6. Ruzhentsev, N.V., Kuzmenko, Yu.A. & Bakhanov, V.P. (1995). Monitoring of atmospheric moisture and water



## COST EFFECTIVE METER OF MOISTURE INTEGRAL PARAMETERS OF THE ATMOSPHERIC COLUMN

N. V. Ruzhentsev<sup>1</sup>, S. S. Zhyla<sup>2</sup>, V. V. Pavlikov<sup>3</sup>,  
V. V. Kosharsky<sup>4</sup>, G. S. Cherepnin<sup>5</sup>

National M.E.Zhukovsky Aerospace University  
«Kharkiv Aviation Institute»

17, Chkalov St, 61000 Kharkiv, Ukraine,

<sup>1</sup>[nvruzh@gmail.com](mailto:nvruzh@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3023-4927>,  
<sup>2</sup>[simeon.zhyla@gmail.com](mailto:simeon.zhyla@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2989-8988>,  
<sup>3</sup>[v.pavlikov@khai.edu](mailto:v.pavlikov@khai.edu), <https://orcid.org/0000-0002-6370-1758>,  
<sup>4</sup>[v.kosharsky@khai.edu](mailto:v.kosharsky@khai.edu), <https://orcid.org/0000-0002-8569-2047>,  
<sup>5</sup>[g.cherepnin@khai.edu](mailto:g.cherepnin@khai.edu), <https://orcid.org/0000-0003-1245-0933>

Continuous remote monitoring of the atmospheric physical parameters is an urgent task for solving the issues related to meteorology, climatology, artificial influence on clouds, studying the physical parameters of cloud cover etc. In the developed countries such issues are solved using science-driven technologies of millimeter wave range radiometry. They allow, in particular, quick restoration of the values of total content and effective temperature of droplet and vaporous moisture in the atmospheric column, and distinguishing the areas with crystalline, droplet or vaporous water phases.

This work aims at substantiating, by calculation and experiment, the possibility of large-scale solving the problems of continuous remote monitoring of the studied atmospheric moisture parameters using the method of centimetre wavelength range radiometry. To determine the best pair of frequencies for restoring the atmospheric moisture parameters based on radiometric data of remote sensing the linear absorption coefficients were calculated for clear atmosphere, for cloudy atmosphere depending on the temperature of drops and for rainfalls of various intensities for 4, 12, 20, 40 and 94 GHz frequencies. In order to calculate these data, we used a well-known MPM model (Atmospheric Millimeter-Wave Propagation Model). At the same time, calculation of the altitude profiles of the atmospheric meteorological parameters was carried out based on the ERA-15 model.

Comparison of the data obtained by calculation, taking into account the progress of the technical parameters of the serial element base, indicated a possibility of solving the above problems in the centimetre wavelength as well. The research presents a description of the diagram and technical solutions, as well as the appearance of a two-frequency radiometric system with 1.5 cm and 2.5 cm ranges created at the National Aerospace University (KhAI) on the basis of an easily accessible modern element base and full-scale tests' results. The budget-friendly focus of the described product allows for radiophysical measurement with a sensitivity of radiometers exceeding 0.01 K while ensuring the cost of small-scale production of the radio technical part of the system, comparable to the cost of TV converters commonly used in everyday life.

**Keywords:** brightness (radiance) temperature; radiometer; sensitivity; wave range

## БЮДЖЕТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГИ В СТОЛБЕ АТМОСФЕРЫ

Н. В. Руженцев<sup>1</sup>, С. С. Жила<sup>2</sup>, В. В. Павликов<sup>3</sup>,  
В. В. Кошарский<sup>4</sup>, Г. С. Черепнин<sup>5</sup>

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»,

ул. Чкалова, 17, 61000, Харьков, Украина,

<sup>1</sup>[nvruzh@gmail.com](mailto:nvruzh@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3023-4927>,  
<sup>2</sup>[simeon.zhyla@gmail.com](mailto:simeon.zhyla@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2989-8988>,  
<sup>3</sup>[v.pavlikov@khai.edu](mailto:v.pavlikov@khai.edu), <https://orcid.org/0000-0002-6370-1758>,  
<sup>4</sup>[v.kosharsky@khai.edu](mailto:v.kosharsky@khai.edu), <https://orcid.org/0000-0002-8569-2047>,  
<sup>5</sup>[g.cherepnin@khai.edu](mailto:g.cherepnin@khai.edu), <https://orcid.org/0000-0003-1245-0933>

Непрерывный дистанционный мониторинг физических параметров атмосферы является актуальной задачей при решении вопросов метеорологии, климатологии, искусственного

воздействия на облака, при исследованиях физики облачного покрова и т. д. В развитых странах мира для решения этих вопросов принято использовать наукоемкие технологии радиометрии миллиметрового диапазона волн (ММ ДВ). Они позволяют, в частности, оперативно восстанавливать значения общего содержания и эффективной температуры капельной и парообразной влаги в атмосферном столбе, различать области с кристаллической, капельной или парообразной фазами воды.

В данной работе расчетным и экспериментальным путем обоснована возможность широкомасштабного решения задач непрерывного дистанционного мониторинга этих параметров атмосферной влаги методом радиометрии сантиметрового диапазона волн (СМ ДВ). Для определения лучшей пары частот для восстановления параметров атмосферной влаги по радиометрическим данным дистанционного зондирования были рассчитаны коэффициенты линейного поглощения для ясной атмосферы, для облаков в зависимости от температуры капель и в дождях различной интенсивности для частот 4, 12, 20, 40 и 94 ГГц. Для расчета этих данных нами использовалась известная модель MPM (Atmospheric Millimeter Waves Propagation Model). При этом, расчет высотных профилей метеорологических параметров атмосферы был проведен на основе модели ЭРА-15.

Возможность решения указанных выше задач в СМ ДВ была показана путем сопоставления полученных расчетным путем данных с учетом прогресса технических параметров серийной элементной базы. Представлено описание схемных и технических решений, а также внешний вид двухчастотной радиометрической системы диапазона 1,5 см и 2,5 см, созданной в Национальном аэрокосмическом университете (ХАИ) на основе легко доступной современной элементной базы и результатов натурных тестовых испытаний. Бюджетная направленность описанной разработки позволяет обеспечить радиофизические измерения с чувствительностью радиометров лучше 0.01 К при обеспечении себестоимости мелкосерийного производства радиотехнической части системы, сопоставимой со стоимостью широко распространенных в быту ТВ конверторов.

**Ключевые слова:** радиояркость температура; радиометр; чувствительность; диапазон волн

Подання до редакції : 06. 06. 2021  
Надходження остаточної версії : 16. 06. 2021  
Публікація статті : 30. 06. 2021

УДК: 551.553.6, PACS number: 92.60.Aa

## WIND POTENTIAL ASSESSMENT OVER MOROCCO'S MARRAKESH - SAFI REGION IN 2021-2050 BASED ON THE RCM'S FORECASTS AS PART OF THE CORDEX-AFRICA PROJECT

Y. El Hadri, M. Slizhe, K. Sernytska

Odessa State Environmental University,  
15 Lvivska str., Odesa, Ukraine, 65016, [magribinets@ukr.net](mailto:magribinets@ukr.net)

The purpose of the study is to determine the features of the spatial distribution of the wind speed in Marrakesh - Safi region in 2021-2050, as well as the distribution of the specific power of the wind flow at various altitudes above the earth's surface to determine the wind class of the area in the coming decades. Currently, the region has two large wind farms: Essaouira-Amogdoul and Tarfayer. To assess the future state of climate in Marrakesh – Safi region, the results of calculations of regional climate models (RCM) of the CORDEX-Africa project for the period 2021-2050 were used. The RCM modeling was carried out for the region of Africa, in a rectangular coordinate system with a spatial resolution of  $\sim 44$  km. Model calculation was performed taking into account the greenhouse gas concentration trajectory of RCP 4.5. As a result of simulation for the period 2021-2050, mean monthly values of wind speed "sfcWind" ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and the daily maximum near-surface wind speed "sfcwindmax" ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 10 m height were obtained. Then, based on the wind speed rows, the values of the wind power density at a height of 50 m and 100 m were calculated. The results of model calculations of wind speed showed that the ensemble mean of wind speed for the period 2021-2050 will be from  $3.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in Kelaat Sraghna Province to  $7.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  on the stretch of the Atlantic coast between Cap Sim and Cap Tafelny. The distribution over the territory will be influenced by proximity to the ocean, models predict the highest wind speeds on the coast, and when moving deep into the region, the wind speed will decrease. The analysis of simulation results showed that in the coastal areas of the region favorable conditions in terms of wind energy development will remain, and the highest wind speeds of the model are predicted on the Atlantic coast between Cap Sim and Cap Tafelny. By the size of the specific power of the wind flow, significant wind resources will have the territory lying along the coast from Cap Sim to the southern border of the region, and in the area of the power plants Essaouira-Amogdoul and Tarfayer models predict the conditions corresponding to the outstanding wind power class.

**Keywords:** CORDEX-Africa; wind speed; Wind Power Density; RCM; Morocco, Marrakesh – Safi.

---

### 1. INTRODUCTION

Today, Morocco has a tendency to increase its energy consumption, as a result of industrial development, demographic growth and changes in people's living standards. By 2040, Morocco's population is expected to reach 40 million, mostly in urban areas [1]. The impact of climate change is already leading to the movement and migration of people across the country. This will entail an additional environmental impact in Morocco. In addition, in recent decades there was a need to quickly address the urgent environmental problems associated with increased levels of greenhouse gas emissions into the atmosphere. In this context, the timely assessment of possible changes in the potential of wind energy in Morocco is an urgent issue that will ensure its energy security in the future. Today, it is

possible to obtain such information by modelling future climate conditions using climate models.

The Moroccan Government has developed the National Energy Strategy, which includes the Moroccan Integrated Wind Energy Program. One of the priorities of this program is to increase the share of renewable technologies in the country's energy sector. In addition, Morocco launched the renewable energy development program [2], which aims to achieve a total installed capacity 2000 MW from wind power, 2000 MW from solar energy and an increase in the capacity of hydropower to 2000 MW by 2020, with further increase of installed renewable capacity to 10 GW to meet the target to generate 52% of energy from renewable sources by 2030 [3, 4]. Today, the course of development of European energy is resolutely aimed at a complete transi-

tion to renewable energy sources. Some of the needs of European consumers are planned to be covered by the transportation of electricity generated by wind and solar power plants in Morocco to Europe. For this in 2018 the World Bank accepted the project with a total cost US\$ 2257.00 million for Morocco's adoption of innovative solar technology, as part of the national goal of developing the country's world-class solar and wind energy resources. This assistance includes US\$420.00 million from EU (European Investment Bank), US\$180.00 million from the French Government (Govt. of [MOFA and AFD (C2D)]), US\$852.00 million from the German Federal Government (Kreditanstalt Fur Wiederaufbau). Thus, the results of the study of the impact of climate change on renewable resources in Morocco are of interest not only for the Moroccan side, but also for stakeholders in the EU.

The study of the wind regime in Morocco was carried out by a group of Moroccan scientists from Mohammed V University [5-7]. Scientists evaluated wind characteristics and wind potential of Morocco from 1978-1989, 1998 and 1993-1994. As a result of the analysis, the distribution of wind speed across the country was constructed and it was concluded that the most favorable wind power areas are the Gibraltar region and the Atlantic coast areas between the cities of Laayoune and Dakhla, and between Casablanca and Agadir.

*The purpose of the study* is to determine the features of the spatial distribution of the wind speed in Marrakesh - Safi region in 2021-2050, as well as the distribution of the specific power of the wind

flow at various altitudes above the earth's surface to determine the wind class of the area in the coming decades.

## 2. MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH

### 2.1 Study Area

Marrakesh - Safi region covers an area of 38445 km<sup>2</sup> and is located on the Atlantic coast of Morocco, at a latitude between 30°45' N and 32°50' N. (Fig. 1). In the south and southeast of the region there are the High Atlas ranges, the height of which reaches 4167 m (Mount Toubkal). The population of the region in 2014 was 4520569 people, of which 69% live in cities [8].

Currently, the region has two large wind farms: Essaouira-Amogdoul and Tarfayer (Table 1), which are included to the Moroccan Integrated Wind Program [9].

### 2.2 Data Source

To assess the future state of climate in Marrakesh - Safi region, the results of calculations of regional climate models (RCM) of the CORDEX-Africa project for the period 2021-2050 were used [10].

The RCM modeling was carried out for the region of Africa, in a rectangular coordinate system with a spatial resolution of ~44 km. Model calculation was performed taking into account the greenhouse gas concentration trajectory of RCP 4.5. 11 climate models were used for the calculation (Table 2).

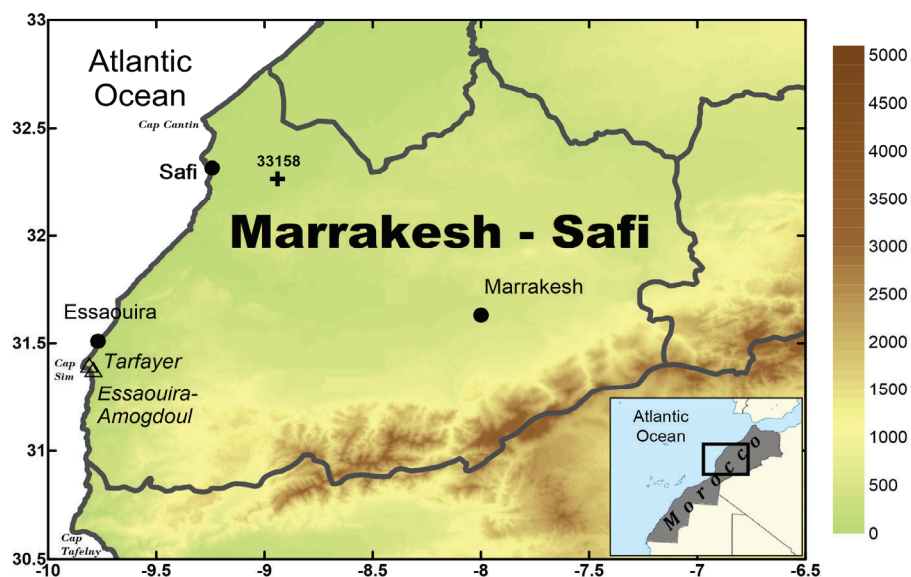


Fig. 1 – Area of study (triangles marked the location of wind farms Essaouira-Amogdoul and Tarfayer)

**Table 1** – Essaouira-Amogdoul and Tarfayer wind farms characteristics [12]

Wind farm name	Details	Status	Coordinates
<b>Essaouira-Amogdoul (YNNA Bio Power)</b>	71 turbines: Gamesa G52/850 (power 850 kW, diameter 52 m); Total nominal power: 60.35 MW; Onshore wind farm	Under construction	31°22'44.7" N; -9°47'7.6" E
<b>Tarfayer (Essaouira)</b>	71 turbines: Gamesa G52/850 (power 850 kW, diameter 52 m); Total nominal power: 60.35 MW ; Onshore wind farm	Commissioning: 2007 Operational	31°23'50.2" N; -9°48'24.3" E

**Table 2** – Regional climate models characteristics

№ of model	Model name	The Atmospheric General Circulation Model	Data Centre
<b>M1</b>	KNMI-ICHEC-EC-EARTH	IFS	CNRM, France
<b>M2</b>	CanESM2	CanCM4	CCCMA, Canada
<b>M3</b>	CNRM-CM5	ARPEGE	CNRM / CERFACS, France
<b>M4</b>	SMHI-ICHEC-EC-EARTH	IFS	CNRM, France
<b>M5</b>	CSIRO Mark 3.6	Mk3 AGCM	CSIRO, Australia
<b>M6</b>	IPSL-CM5A-MR	LMDZ	IPSL, France
<b>M7</b>	MIROC5	AGCM CCSR	AORI/NIES/JAME S&T, Japan
<b>M8</b>	HadGEM2-ES	HadGEM2-A	Hadley Center, UK
<b>M9</b>	MPI-ESM-LR	ECHAM6	MPI, Germany
<b>M10</b>	NorESM1	CAM4-Oslo	NCC, Norway
<b>M11</b>	GFDL-ESM2M	AM3	GFDL, USA

As a result of simulation for the period 2021-2050, mean monthly values of wind speed "sfcWind" (m·s<sup>-1</sup>) and the daily maximum near-surface wind speed "sfcwindmax" (m·s<sup>-1</sup>) at 10 m height were obtained.

### 2.3 The wind power density

The wind power density is a climate characteristic that allows an assessment of the wind potential of a specific area, as well as providing a justification for using the layout and design of wind turbines [11]. The wind power density depends on the distribution of the repeatability of wind speeds and the nature of the underlying surface in a particular area. The most accurate description of the wind speed for flat terrain conditions can be obtained using Weibull distribution [11]:

$$f(u) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{u}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{\beta}\right)^\gamma\right], \quad (1)$$

where  $f(u)$  is the frequency of occurrence of wind speed  $u$ ,  $\beta$  – scaling factor (m·s<sup>-1</sup>) ( $\beta = 1.1\bar{u}$ ),  $\gamma$  – the shape factor, which is describes the shape of the

distribution. Factor  $\gamma$  is calculated by the expression [7]

$$\gamma = C_u^{-1.086}, \quad (2)$$

where  $C_u$  – coefficient of variation, ( $C_u = \sigma/\bar{u}$ ).

Weibull distribution, in the case when the factor  $\gamma = 1$ , called the exponential distribution, at  $\gamma = 2$  – the Rayleigh distribution, at  $\gamma = 3$  distribution is approaching to Normal (Gaussian) distribution [13]. Since, the observed values of the wind show the frequency distributions, which are well described using the Rayleigh distribution, the manufacturers use this distribution when calculating standard performance indicators for wind turbines. The size of the factor  $\gamma$  is influenced by the local wind climate and the landscape of the terrain for which calculations are carried out. Low factor value  $\gamma < 1.8$  is typical for wind climates with a high content of thermal winds. High factor value  $\gamma > 2.5$  is characteristic for very constant wind climates (for example, trade winds). Both factor,  $\beta$  and  $\gamma$ , depend on the height above the underlying surface, up to a height of 100 m, their values increase, above 100 m the value of the factor  $\gamma$  decreases [11].

In this study, the estimate of the wind power density was performed using the formula [11]:

$$N_e = \frac{1}{2} \rho \beta^3 \Gamma \left( \frac{3}{\gamma} + 1 \right), \quad (3)$$

where  $N_e$  – wind power density,  $\rho$  – air density (1.226 kg·m<sup>-3</sup>),  $\Gamma \left( \frac{3}{\gamma} + 1 \right)$  – gamma function. To calculate gamma function was used interpolation expression, which for value  $x < 60$  has an error less  $10^{-4}$  [11]:

$$\Gamma(x) \cong \frac{\sqrt{\frac{2\pi}{y}} \exp\{y[\ln(y) - 1] + \frac{1}{12y}\}}{x(x+1)(x+2)(x+3)(x+4)(x+5)}, \quad (4)$$

where  $y = x + 6$ .

The calculation of the predicted wind power density for the period 2021-2050 was performed using expressions (3) – (4). As a base value of the wind speed was used value of wind speed calculated by the ensemble of the regional climate models of the CORDEX-Africa project [10, 14]. The factor  $\gamma$  was adopted at 2.5, based on the considerations that much of Morocco's territory was affected by trade winds during the year. In calculating of the wind power density we are proceed from the assumption that climate change will only manifest itself in changing the value of the wind speed while maintaining its distribution factors, so the results provide an approximate estimate of the future power of the wind flow.

Calculation of wind speed at 50 m and 100 m height above the earth's surface was done using the expression (5) [15]

$$\frac{u_2}{u_1} = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^m, \quad (5)$$

$u_1$  and  $u_2$  are the wind speeds at heights  $h_1$  and  $h_2$ ,  $m$  – the wind shear exponent, which is depends on height  $h$ , surface roughness, atmospheric stability, orography, and season of the year. On average accept  $m = 0.14$ .

Then, based on the values of wind speed at an altitude of 50 m and 100 m above the earth's surface, wind power density ( $N_e$ ) was calculated at these heights, and using the criteria (Table 3), the wind class of the study region in 2021-2050 was determined.

Table 3 – Classes of wind power density [16]

Wind power class	50 m height	
	Wind power density, W·m <sup>-2</sup>	Mean wind speed, m·s <sup>-1</sup>
Poor	< 200	< 5.6
Marginal	200 - 300	5.6 - 6.4
Fair	300 - 400	6.4 - 7.0
Good	400 - 500	7.0 - 7.5
Excellent	500 - 600	7.5 - 8.0
Outstanding	600 - 800	8.0 - 8.8
Superb	> 800	> 8.8

The area suitable for large wind farms should be of wind energy class 4 or higher [16].

## 2.4 Daily Maximum Wind Speed and Gust Factor

The daily maximum wind speed (*DMWS*) is the highest daily value of the wind speed from the number of urgent observations and represents the maximum wind gust recorded at the station in one of the observation periods. *DMWS* is closely related to economic losses and risks. In the event of a sudden turbulent gust, wind speed, turbulence and wind shear can change dramatically. The resulting imbalance of the rotor while maintaining the output power of the generator and a large inertia of mechanical components lead to an imbalance of the load and speed of the generator, and consequently, oscillations and rocking of the wind turbine tower [16], which leads to a rapid failure of its components.

In RCM, the *DMWS* is taken to be the maximum of four instant wind speeds calculated for 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00 UTC. Different RCMs use different approaches to calculate the daily maximum wind speed. For example, the SMHI model takes into account turbulent kinetic energy, mean wind and static stability in the boundary layer, the KNMI-RACMO2 model calculates the rate of wind gusts, adding to a wind speed at a height of 10 m component that contains static stability in the boundary layer of the atmosphere, calculating the MPI- REMO are based on empirical assumptions, taking into account turbulent kinetic energy in the lowest layer of the model [17].

The relation of the *DMWS* with the daily mean wind speeds can be established with the help of the peak-gust factor [18], which is calculated as the ratio

$$G = \frac{u_g}{\bar{u}} - 1, \quad (6)$$

where  $G$  – the peak-gust factor,  $u_g$  – the daily peak-gust wind speed, and  $\bar{u}$  – the daily mean wind speed.  $G$  is a dimensionless quantity that takes the value  $0 \leq G < +\infty$  (with  $G = 0$ , when  $u_g = \bar{u}$ ).

When averaged for a certain period of time,  $G$  reflects the climatic impulse of the wind. Studies show that  $G$  is sensitive to meteorological conditions, for example, as a rule, its value decreases as the mean wind speed increases. The surface roughness affects  $G$ , it takes higher values over rough surfaces.  $G$  is influenced by the state of atmospheric stability, the magnitude  $G$  increases with decreasing atmospheric stability, although this effect is not as strong as the connection  $G$  with the average wind [19].

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Spatial distribution of wind speed in 2021-2050

The results of model calculations of wind speed showed that the ensemble mean of wind speed for the period 2021-2050 will be from  $3.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in Kelaat Sraghna Province to  $7.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  on the stretch of the Atlantic coast between Cap Sim and Cap Tafelny (Fig. 2a.). The distribution over the territory will be influenced by proximity to the ocean, models predict the highest wind speeds on the coast, and when moving deep into the region, the wind speed will decrease.

Based on the fact that in the first approximation, the wind energy potential can be estimated at the level of average annual wind speed, which should be  $\geq 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  at an altitude of 10 m above the earth's surface [17], it follows that in the coming decades, favorable conditions for the development of wind power will remain in the coastal areas of the region.

The annual run of wind speed is of great importance in assessing the wind energy potential of a particular area and provides important information on the efficiency of the use of wind turbines in terms of the coherence of the wind energy flow schedule with the energy load schedule of consumers [15]. In Fig. 2b shows the annual wind speed variation at the 33158 grid node located in the northwest of Marrakesh – Safi region. The analysis showed that the model predicts the maximum value of the mean monthly wind speed in July ( $6.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), and the minimum in December ( $4.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Also, you can note the secondary maximum wind speed in May ( $5.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). In general, the highest wind speed

models predict from April to August.

The reason for increasing the wind speed in this area in the warm half-year is the growth of baric gradients on the Atlantic coast as a result of seasonal changes in the pressure field. In the recurrence of Circulation Weather Types in Morocco, this is manifested in the prevalence of the repeatability of types in the summer (more than 95% of cases in 1960-2006), which are characterized by the strengthening of the Azores High, which leads to an increase in baric gradients in the coastal zone [20]. Another factor that contributes to increasing the wind speed in the area during the summer months is the development of the breezy circulation.

Analysis of the annual run of *DMWS* showed that it has a similar wind speed character (Fig. 2b). Its maximum mean monthly value the model is predicted in July ( $9.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), and the minimum in December ( $6.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

The magnitude of  $G$  varies from 0.43 (in January) to 0.58 (in September). The highest values correspond to the month, in which, along with elevated wind speeds, models predict a large difference between the daily maximum wind speed and the mean wind speed.

#### 3.2 Wind power density in 2021-2050

Analysis of the mean wind power density at a height of 50 m for the period 2021-2050 (Fig. 2c) showed that the eastern half of the region will be characterized as a territory with poor wind power class (up to  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). An area with good class (more than  $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) will be a strip lying along the coast from Cap Sim to the southern border of the region, where its width will reach approximately 40 km. The highest wind potential the model is predicted on the coast between Essaouira and Cap Tafelny, where the wind farms Essaouira-Amogdoul and Tarfayer are located (more than  $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

The distribution of wind power density at 100 m height above the earth's surface showed that the territory having good wind class will be a strip about 50 km wide, located along the Atlantic coast (Fig. 2d), and directly in the area where wind farms are located predict the value of  $Ne$  above  $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

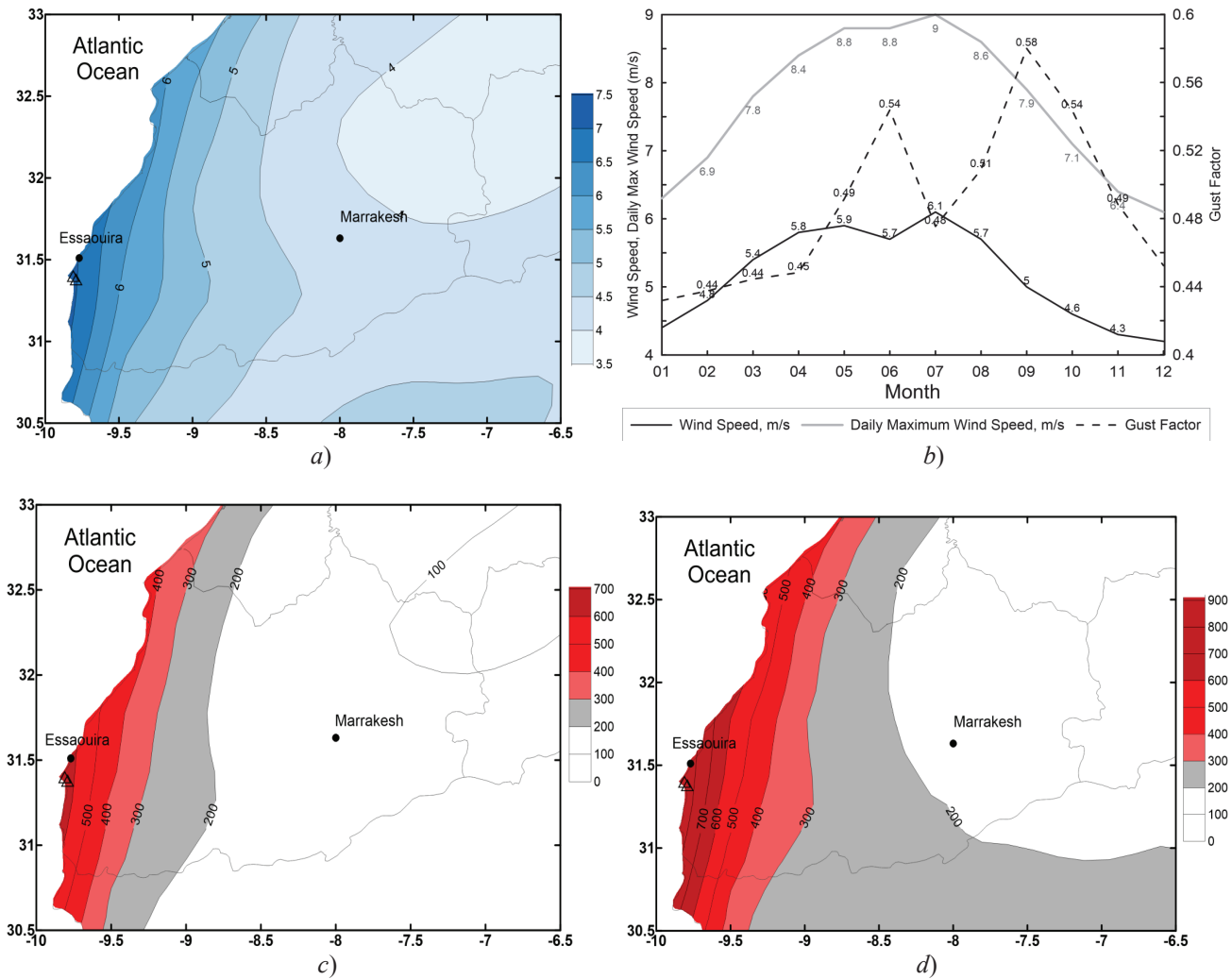


Fig. 2 – The ensemble average wind speed ( $m \cdot s^{-1}$ ) at a height of 10 m for the period 2021-2050 (a), the annual run of wind speed ( $m \cdot s^{-1}$ ), daily maximum wind speed ( $m \cdot s^{-1}$ ) and gust factor in the 33158 grid node of model for the period 2021-2050 (b),  $N_e$  ( $W \cdot m^{-2}$ ) in 2021-2050 at 50 m height (c),  $N_e$  ( $W \cdot m^{-2}$ ) in 2021-2050 at 100 height (d)

#### 4. CONCLUSIONS

An analysis of the results of modeling the wind speed in 2021-2050 showed that in the coastal areas of the region, favorable conditions for the development of wind power will continue; models predict the highest wind speeds in the section of the Atlantic coast between Cap Sim and Cap Tafelny.

The highest wind speeds will be observed in the summer period, which coincides with an increase in the use of electricity by consumers for cooling.

By value of the wind power density at a height of 50 m good wind class will have territory, which located along the coast from Cap Sim to the southern border of the region. The area in which the Essaouira-Amogdoul and Tarfayer wind farms is located will have the outstanding wind power class. Thus, in 2021-2050 on the territory of Marrakesh – Safi region, we can expect favorable conditions for the placement of large wind turbines with a nominal

capacity of up to 10 MW, which if connections can form larger wind farms.

Today, new approaches to downscaling of the RCMs are being introduced, allowing more detailed information on the future climate to be obtained. For simulate of wind speed, reducing the spatial resolution of model calculations is one of the most important steps, because wind speed is a very variable meteorological element. Thus, future research will focus on obtaining more detailed information of wind speed, taking into account new model calculations with a higher spatial resolution.

#### REFERENCES

1. *Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region. Final Report by German Aerospace Center.* Available at: [https://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal\\_news/new\\_sarchiv2008\\_1/algerien\\_med\\_csp.pdf](https://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal_news/new_sarchiv2008_1/algerien_med_csp.pdf) (accessed 7 May 2021).
2. Alhamwi, A., Kleinhans, D., Weitemeyer, S., et al. (2015). Moroccan National Energy Strategy reviewed from a



- meteorological perspective. *Energy Strategy Reviews*, 6, pp. 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2015.02.002>
3. Morocco plans to add 10 GW of power from renewable energy sources by 2030. Report: Morocco 2018. Available at: <https://oxfordbusinessgroup.com/analysis/viable-alternative-plans-add-10-gw-power-renewable-sources-2030> (accessed 7 May 2021)
  4. Accelerating the development of renewables on the MV market in Morocco. A Pöyry Report to RES4MED. Available at: [https://www.res4med.org/wp-content/uploads/2018/07/RES4MED\\_Accelerating-the-development-of-renewables-on-the-MV-market-in-Morocco\\_Jun2018.pdf](https://www.res4med.org/wp-content/uploads/2018/07/RES4MED_Accelerating-the-development-of-renewables-on-the-MV-market-in-Morocco_Jun2018.pdf) (accessed 7 May 2021).
  5. Nfaoui, H., Buret, J. & Sayigh, A.A.M. (1998). Wind characteristics and wind energy potential in Morocco. *Solar Energy*, 63(1), pp. 51-60.
  6. Raihani, A., Hamdoun, A., Bouattane, O. et al. (2012). Toward an accurate assessment of wind energy platform of Mohammedia city, Morocco. *Engineering Science and Technology: An International Journal*, 2(5), pp. 951-958.
  7. Sadouk, A. & Djebli, A. (2015). Wind Energy Potential in Tetuan City Northern of Morocco. *International Journal of Science and Research*, 4(10), pp. 689-693.
  8. Morocco Regions. Statoids. Available at: <http://www.statoids.com/uma.html> (accessed 7 May 2021)
  9. Schinke, B., Klawitter, J. et al. (2016). *Background Paper: Country Fact Sheet Morocco Energy and Development at a glance*. Bonn: Germanwatch.
  10. IS-ENES climate4impact portal. Available at: <https://climate4impact.eu/> (accessed 7 May 2021)
  11. El Hadri, Y. et al. (2019). Wind energy land distribution in Morocco in 2021–2050 according to RCM simulation of CORDEX-Africa project. *Arab J Geosci*, 12, pp. 753. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4950-7>
  12. *Wind farms databases. The Wind Power*. Available at: <https://www.thewindpower.net/index.php> (accessed 5 May 2021)
  13. Udalov, S.N., & Zubova, N.V. (2013). Simulation of Wind Speed in the Problems of Wind Power. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 6(2), pp. 150-165.
  14. Kim, J., Waliser, D.E. et al. (2014). Evaluation of the CORDEX-Africa multi-RCM hindcast: systematic model errors. *Clim Dyn.*, 42(5-6), pp. 1189-1202. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1751-7>
  15. El Hadri, Y., Khoklov, V.N. & Slizhe, M.O. (2018). Regional climate models projections of wind speed in Morocco for period 2020-2050. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 6(3), pp.1-7. <https://doi.org/10.9734/AJEE/2018/41112>
  16. Tong, W. (2010). *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. Southampton: WIT Press.
  17. Donat, M.G. et al. (2011). Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, pp. 1351-1370. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1351-2011>
  18. Graybeal, D.Y. (2006). Relationships among daily mean and maximum wind speeds, with application to data quality assurance. *Int. J. Climatol.*, 26, pp. 29-43. <https://doi.org/10.1002/joc.1237>
  19. Harris, A.R. (2016). *On Establishing a Climatology of Gust Factors and Assessing Their Ability to Forecast Wind Gusts in Milwaukee, WI*. Theses and Dissertations. The University of Wisconsin. Available at: <https://dc.uwm.edu/etd/1150> (accessed 5 May 2021)
  20. Born, K., Fink, A.H. & Knippertz, P. (2010). Meteorological processes influencing the weather and climate of Morocco. In: Speth, P., Christoph, M., Diekkrüger, B., Bollig, M., Fink, A.H., Goldbach, H., Heckeile, T., Menz, G., Reichert, B., Rössler, M. (eds.). *Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa*. Springer, pp. 150-163. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12957-5>

## ОЦІНКА ВІТРОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ РЕГІОНУ МАРОККО МАРРАКЕШ - САФІ У 2021-2050 РР. НА ОСНОВІ ПРОГНОЗІВ РКМ ПРОЕКТУ CORDEX-АФРИКА

**Ель Хадрі Ю., Сліже М.О., Серницька К.**

*Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [magribinets@ukr.net](mailto:magribinets@ukr.net)*

Перехід до вироблення електроенергії з поновлюваних джерел сьогодні є одним з найбільш актуальних напрямків в енергетичній сфері. Сьогодні на території регіону Марракеш - Сафі Королівства Марокко розміщена одна з найбільших в країні вітроелектростанція Tafraout, а також знаходиться в стадії будівництва станція Essaouira-Atogdoul. Тому, значний інтерес представляє стан вітрових ресурсів у даному регіоні в найближчі десятиліття. Метою дослідження є визначення особливостей просторового розподілу швидкості вітру в 2021-2050 рр. у регіоні, а також розподіл питомої потужності вітрового потоку на висотах 50 і 100 м. Оцінка вітрових характеристик у 2021-2050 рр. була виконана на основі розрахунків середньомісячних значень швидкості вітру і добового максимуму швидкості вітру на висоті 10 м регіональних кліматичних моделей проекту CORDEX-Africa. Визначення вітрового класу території виконувалось на основі величини питомої потужності вітрового потоку на висоті 50 і 100 м. Результати модельних розрахунків показали, що середня за ансамблем швидкість вітру для періоду 2021-2050 рр.

складе від  $3,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  в провінції Келаа-ес-Серагіна до  $7,2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  на ділянці Атлантичного узбережжя між мисом Сім і мисом Тафельні. На розподіл по території впливатиме близькість до океану, моделі передбачають найвищі швидкості вітру на узбережжі, а при просуванні вглиб регіону швидкість вітру буде зменшуватися. Аналіз результатів моделювання показав, що в прибережних районах збережуться сприятливі для розвитку вітроенергетики умови, найбільш високі швидкості вітру моделі прогнозують на ділянці Атлантичного узбережжя між мисом Сім і мисом Тафельні. За величиною питомої потужності вітрового потоку значними вітровими запасами буде володіти територія, яка лежить уздовж узбережжя від мису Сім до південної межі регіону, а район розміщення електростанцій Essaouira-Amogdoul і Tarfayer за прогнозами моделей буде мати клас, який характеризується видатними вітровими ресурсами.

**Keywords:** CORDEX-Африка; швидкість вітру; питома потужність вітрового потоку; регіональні кліматичні моделі, Марокко; Марракеш – Сафі.

## ОЦЕНКА ВЕТРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕГИОНА МАРОККО МАРРАКЕШ - САФИ В 2021-2050 ГГ. НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗОВ РКМ ПРОЕКТА CORDEX-AFRICA

Эль Хадри Ю., Слиже М.О., Серницкая К.

*Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [magribinets@ukr.net](mailto:magribinets@ukr.net)*

В настоящее время на территории региона Марракеш – Сафи Королевства Марокко размещена одна из крупнейших в стране ветроэлектростанция Tarfayer, а также находится на стадии строительства станция Essaouira-Amogdoul. Поэтому значительный интерес представляет состояние ветровых ресурсов в данном регионе в ближайшие десятилетия. Целью исследования является определение особенностей пространственного распределения скорости ветра в 2021-2050 годах в регионе, а также распределения удельной мощности ветрового потока на высотах 50 и 100 м для определения ветрового класса данной территории в ближайшем будущем. Оценка ветровых характеристик в 2021-2050 гг. была выполнена на основе расчетов среднемесячных значений скорости ветра и суточного максимума скорости ветра на высоте 10 м региональных климатических моделей проекта CORDEX-Африка. Определение ветрового класса территории производилось на основе значений удельной мощности ветрового потока на высотах 50 м и 100 м. Анализ результатов моделирования показал, что в прибрежных районах региона сохранятся благоприятные для развития ветроэнергетики условия, наиболее высокие скорости ветра модели прогнозируют на участке Атлантического побережья между мысом Сим и мысом Тафельни. По величине удельной мощности ветрового потока значительными ветровыми запасами будет обладать территория, лежащая вдоль побережья от мыса Сим до южной границы региона, а районы размещения электростанций Essaouira-Amogdoul и Tarfayer, по прогнозам моделей, будут обладать классом с выдающимися ветровыми ресурсами.

**Ключевые слова:** CORDEX-Африка; скорость ветра; удельная мощность ветрового потока; региональные климатические модели; Марокко, Марракеш – Сафи.

*Подання до редакції : 08. 05. 2021  
Надходження остаточної версії : 15. 06. 2021  
Публікація статті : 30. 06. 2021*

УДК 556.16

## СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ ВОДИ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ ЗА МЕТОДОМ «INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION»

Л. О. Горбачова, В. С. Приходькіна, Б. Ф. Христюк,  
Т. О. Заболотня, В. О. Розлач

Український гідрометеорологічний інститут,  
проспект Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна,  
gorbachova@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1033-9385>

Знання щодо тенденцій максимального стоку річок мають важливе практичне значення, особливо для проектування та експлуатації гідротехнічних споруд. У даній статті надані результати дослідження максимального стоку річки Південний Буг. Вода річки широко використовується для гідроенергетики, промислового та комунального водопостачання, сільського господарства, зрошення, судноплавства, туризму тощо.

У роботі для дослідження максимального стоку води використано метод «Indicators of Hydrologic Alteration» (ІНА), який широко використовується у світі. За цим методом розраховують кількісні статистичні характеристики водного стоку річок, озер, водосховищ і визначають ступінь змін їхнього гідрологічного режиму. ІНА застосовують для водних об'єктів, які мають природний або зарегульований стік. Однак, в Україні метод ІНА поки що не набув широкого вжитку.

Метою роботи є використання методу «Indicators of Hydrologic Alteration» для дослідження характеристик максимального стоку води та їхніх змін вздовж річки Південний Буг.

Дослідження виконано за даними спостережень 5 гідрологічних постів, які розташовані вздовж річки Південний Буг. Використано щоденні середньодобові витрати води від початку спостережень по 2018 та 2019 рр. включно. Водний стік річки на кожному гідрологічному посту було розподілено на п'ять складових: «Extreme low flows» (надзвичайно низький стік), «Low flows» (низький стік), «High-flow pulses» (пульсації високого стоку), «Small floods» (невеликі повені), «Large floods» (великі повені). Це надало змогу виокремити із загального стоку води три складові високого (максимального) стоку, для яких і було розраховано статистичні показники ІНА.

Виявлено, що довготривалі зміни високого стоку відрізняються в кожному із трьох його компонентів, хоча і мають загальні тенденції. Найбільш значимі зміни виявлено для великих повеней, тоді як для пульсацій високого стоку, навпаки, не було виявлено суттєвих змін. Загальні тенденції високого стоку показують, що з часом величини максимальних витрат води мають тенденцію до зменшення, а тривалість періодів з високим стоком зростає.

Значення основних статистичних показників високого стоку поступово зростають від витoku до гирла річки, що повністю відповідає фізико-географічним умовам його формування. Разом з цим, виявлено деякі особливості високого стоку. Так, найбільшу тривалість невеликі повені та пульсації високого стоку мають у верхів'ї річки.

У середньому на р. Південний Буг великі повені повторюються 1 раз на 10 років, невеликі – 1 раз на 2 роки, пульсації високого стоку – 4-8 разів на рік у верхів'ї та 9-14 разів на рік у середній течії.

**Ключові слова:** максимальний стік; річка Південний Буг; статистичний аналіз; щоденні витрати води; ІНА

### 1. ВСТУП

Найбільші витрати води, які спостерігаються на річках у період водопіль та паводків спричиняють значні і тривалі затоплення територій, іноді з катастрофічними наслідками. У світі такі

явища наносять значні матеріальні збитки, які складають мільярди доларів [1-5]. Отже, відомості щодо тенденцій і характеристик максимального стоку річок є дуже важливими для інформування відповідних органів управління з метою запобігання негативних наслідків. Окрім того,

від правильної оцінки максимальних витрат води при проектуванні та будівництві гідротехнічних споруд залежить безперерйність їхньої роботи за період служби, а також безпека прилеглих до річок об'єктів інфраструктури, у тому числі, населених пунктів, промислових підприємств, до-ріг, сільськогосподарських угідь, тощо [6, 7]. Необхідно також враховувати, що за прогнозами вчених небезпечні водопілля та паводки стануть більш звичайним явищем у майбутньому, у теплішому кліматі [8-12].

Оцінювання максимальних витрат води традиційно виконують статистичними методами. Найбільш часто використовують ймовірнісні підходи для визначення розрахункових характеристик стоку річок. Визначення максимального стоку річок різної ймовірності перевищення дозволяє задовольнити більшість потреб споживачів, наприклад, визначати повторюваність настання небезпечних весняних водопілля, зони можливого затоплення територій при їхньому проходженні, тощо. Разом з цим, такий підхід дозволяє оперувати тільки певним набором інформації (витрата води різної ймовірності перевищення, середнє значення, коефіцієнти варіації та асиметрії). Цієї інформації недостатньо для вирішення багатьох задач. У світі останнім часом все більше науковців розроблюють нові методологічні підходи, які характеризуються використанням і поєднанням різних методів, даних, тощо [3, 9, 11, 13, 14]. Такі рішення зазвичай поєднують, наприклад, статистичний і детерміністичний підходи, використовують додаткові дані, параметри, тощо.

У світі набув широкого вжитку метод Indicators of Hydrologic Alteration (ІНА), який було розроблено наприкінці ХХ століття в США [15-17]. Цей підхід дозволяє розраховувати кількісні статистичні характеристики для оцінювання водного стоку річок, озер та водосховищ і ступеня змін їхнього гідрологічного режиму. Однак, в Україні метод ІНА поки що не використовується, хоча він дозволяє дуже швидко обробляти значні масиви гідрологічної інформації, оскільки для розрахунків використовується програмне забезпечення, яке є у вільному доступі для дослідників. Підходи застосування ІНА постійно удосконалюються. Сьогодні програмне забезпечення дозволяє розраховувати 67 статистичних показників [18].

Метою роботи є використання методу Indicators of Hydrologic Alteration для дослідження характеристик максимального стоку води та їхніх змін вздовж річки Південний Буг.

## 2. ОПИСАННЯ ОБ'ЄКТА, ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Об'єкт дослідження

Басейн річки Південний Буг охоплює частину Волино-Подільської та Дніпровської височини, а також Причорноморської низовини. Річка протікає виключно в межах України. Водозбір річки займає 10,6 % території України і складає 63700 км<sup>2</sup>, її довжина – 806 км, середній похил – 40 см/км. Річка тече з північного заходу на південний схід і впадає в Бузький лиман, який на висоті 0,2 м над рівнем моря з'єднується з Чорним морем [19] (рис. 1).

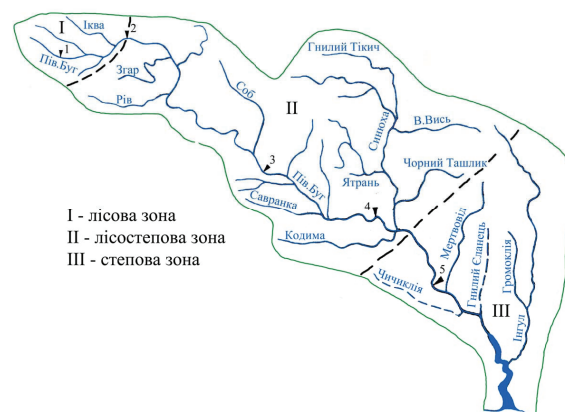


Рис. 1. – Схема басейну річки Південний Буг та розташування основних гідрологічних постів на її руслі (нумерація постів відповідає таблиці 1)

Fig. 1 – Scheme of the Southern Buh River Basin and location of the main gauge stations on its channel (numbering of posts corresponds to table 1)

Для басейну річки Південний Буг характерне чітко виражене весняне водопілля, під час якого формується від 35 до 60% річного стоку [20]. Басейн Південного Бугу можна умовно розділити на три частини, які відрізняються між собою за умовами формування водного стоку (рис. 1) [19, 21]:

I) Верхня частина басейну, знаходиться у лісовій зоні. Її може характеризувати гідрологічний пост р. Південний Буг – с. Селище: площа водозбору – 9100 км<sup>2</sup>, довжина від гирла – 550 км, середня багаторічна витрата води – 28,4 м<sup>3</sup>/с, найбільша витрата води весняного водопілля – 250 м<sup>3</sup>/с (21.03.2003). Найбільші витрати води спостерігаються у період весняного водопілля, а найменші – у зимовий період з грудня по лютий.

II) Середня частина басейну, розташована у лісостеповій зоні. Замикальним постом цієї зони, можна вважати гідрологічний пост р. Південний Буг – смт Олександрівка: площа водозбору –

**Таблиця 1** – Список обраних гідрологічних постів на річці Південний Буг  
**Table 1** – List of selected gauge stations on the Southern Buh River

№	Назва посту на р. Південний Буг	Відстань від гирла, км	Площа водозбору, км <sup>2</sup>	Широта/Довгота	Висота над рівнем моря, м БС	Щоденні середньодобові витрати води	
						Період	$Q_{сеп.}$ , м <sup>3</sup> /с
1	с. Пирогівці	712	827	49,22/27,15	274	1964-2019	3,91
2	с. Лелітка	641	4000	49,33/27,54	250	1936-40, 1943, 1964-2019	13,9
3	с. Тростяничик	369	17400	48,30/29,23	156	1931-35, 1950-60, 1964-67, 1969-2018	45,8
4	с. Підгір'я	220	24600	48,05/30,40	78	1926-40, 1943, 1958-2018	57,1
5	сміт Олександрівка	132	46200	47,41/31,16	10	1914-22, 1924-31, 1933-40, 1943-2019	83,7

46200 км<sup>2</sup>, довжина від гирла – 132 км, середня багаторічна витрата води – 83,7 м<sup>3</sup>/с, найбільша витрата води весняного водопілля – 5320 м<sup>3</sup>/с (08.04.1932). Найбільш багатководними місяцями цієї частини басейну є лютий, березень та квітень. Найменші витрати спостерігаються у літньо-осінній період.

III) Нижня частина басейну р. Південний Буг, розташована у степовій зоні на Причорноморській низовині. Для цієї зони немає замикального посту спостережень щодо витрат води. Переважна більшість річок цієї зони пересихає у літній період, а взимку перемерзає. Літні дощі (за винятком сильних) не утворюють поверхневого стоку.

У цілому для басейну Південного Бугу характерним є помірно-континентальний клімат. Коливання середньої багаторічної температури повітря у верхній та середній частинах басейну – 7,1-8,1°C, а нижньої частини – 8,0-10°C. Різниця між середніми багаторічними температурами повітря верхньої і нижньої частини басейну може становити 3,1°C.

Кількість опадів поступово зменшується від верхів'я до гирла річки. У верхній частині водозбору річки річна норма опадів становить 670 мм, у середній – 550, а нижній – 440-470 мм. У теплий період року випадає 60-70 % від загальної суми опадів [22].

Природний стік Південного Бугу зазнає впливу господарської діяльності. Так, в басейні створено понад 8000 штучних водойм. Вода річки широко використовується для гідроенергетики, промислового та комунального водопостачання, сільського господарства, зрошення, судноплавства, туризму тощо [23].

## 2.2 Вихідні дані

У дослідженні використано ряди спостережень 5 гідрологічних постів, які розташовано безпосередньо на руслі річки Південний Буг

(табл. 1, рис. 1). Використано щоденні середньодобові витрати води від початку спостережень по 2018 та 2019 рр. включно. На жаль, гідрологічний пост біля села Селище не можна використати для дослідження, оскільки спостереження на цьому посту розпочалися тільки у 2002 році і, відповідно, їхня тривалість є недостатньою. Обрані пости спостережень досить рівномірно розташовані вздовж річки, що дозволить простежити розраховані статистичні показники за ІНА та дослідити їхні зміни.

## 2.3 Методи дослідження

Для дослідження максимального стоку води р. Південний Буг використано метод Indicators of Hydrologic Alteration [18]. ІНА працює зі щоденними рівнями, витратами річок, озер і підземних вод та дозволяє визначати статистичні показники природного та порушеного гідрологічного режиму водних об'єктів. За цим методом водний стік річки умовно розкладається на п'ять складових:

- «**Extreme low flows**» (надзвичайно низький стік) – маловоддя, яке спостерігається на річках у періоди посух.

- «**Low flows**» (низький стік) – спостерігається на річках у періоди після весняних водопіль, зимових та дощових паводків, коли живлення річки відбувається тільки за рахунок надходження ґрунтових вод.

- «**High-flow pulses**» (пульсації високого стоку) – спостерігаються на річках під час злив влітку або відлиг узимку, а також з інших причин (попуски водосховищ, тощо). При такому різновиді стоку річка не виходить з берегів.

- «**Small floods**» (невеликі повені) – теж саме, що і «**High-flow pulses**», але з виходом річки на заплаву без катастрофічних наслідків.

- «**Large floods**» (великі повені) – надзвичайно високі повені, які трапляються рідко та спричиняють катастрофічні наслідки.

Для розділення масивів щоденних витрат во-

ди на складові використовувалися значення параметрів, які рекомендовано розробником ІНА [18]. Усі щоденні витрати води, які перевищують 75-й перцентиль середніх добових витрат води за увесь період спостережень, відносяться до високого стоку, а ті, що нижче 50-го перцентилля – до низького стоку. Між цими двома значеннями високий стік розпочинається тоді, коли щоденні витрати води зростають більше ніж на 25% за день і закінчується, коли відбувається зниження щоденних витрат води менше ніж на 10% за добу. Невеликі повені визначаються як високий стік з максимальною витратою, яка спостерігається не частіше одного разу на два роки, а великі повені – як високий стік з максимальною витратою, яка спостерігається не частіше одного разу на десять років. Усі високі витрати води, які не відносяться до великих та невеликих повеней, вважаються пульсаціями високого стоку. До надзвичайно низького стоку відносять витрати води, які менші 10-го перцентилля, а до низького стоку – витрати води, що перебувають в межах 10-50-го перцентилів.

Для розрахунків параметрів максимального стоку Південного Бугу використано програмне забезпечення «Indicators of Hydrologic Alteration» (ІНА), версії 7.1.0.10, яке розроблено The Nature Conservancy (TNC) впродовж 1996-2009 рр. У дослідженні розраховувались наступні статистичні показники:

- порогові значення витрат води, м<sup>3</sup>/с;
- середні значення витрат води при проходженні піка, м<sup>3</sup>/с;
- середня тривалість повеней, доба;
- середня частота повеней, кількість випадків/рік;
- середня дата (юліанська) настання піку;
- середні значення інтенсивності росту витрат води на підйомі, (м<sup>3</sup>/с)/доба;
- середні значення інтенсивності зниження витрат води на спаді, (м<sup>3</sup>/с)/доба.

«Юліанські дати» - це технічний прийом, який враховує різницю в одну добу між тривалістю високосного і невисокосного року. У «юліанському календарі» ІНА тривалість кожного року становить 366 днів. У високосний рік «юліанська дата» 60 відповідає даті - 29 лютого. У невисокосний рік «юліанська дата» 60 залишається порожньою. Завдяки цьому прийому кожна дата звичайного календаря відповідає одній і тій же даті «юліанського календаря».

У роботі також було проаналізовано зміни характеристик високого стоку вздовж річки та з часом.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Максимальні середньомісячні витрати води на р. Південний Буг спостерігаються у квітні (рис. 2 а). Зазвичай найбільші середньомісячні багаторічні витрати води у верхній та середній течії р. Південний Буг спостерігається також у квітні. Вийнятком є пост спостережень біля смт Олександрівка, для якого така витрата спостерігається у березні (рис. 2 б).

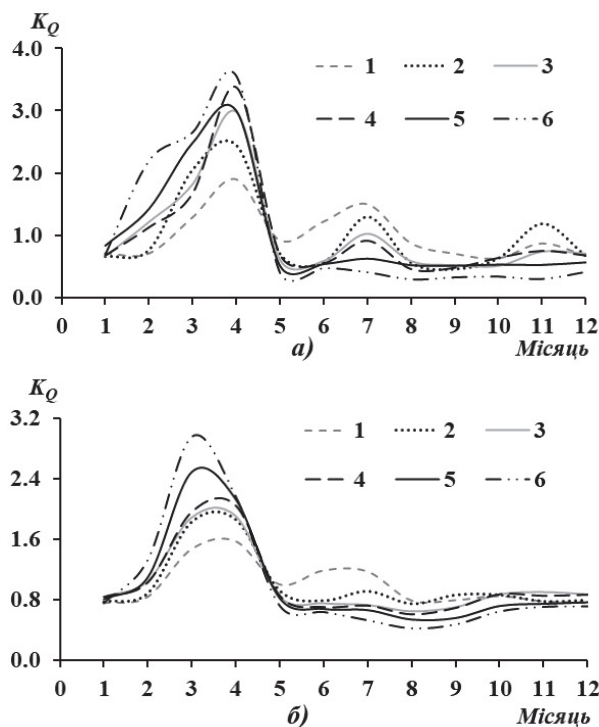


Рис. 2. – Максимальні середньомісячні витрати води (а) та середньомісячні багаторічні витрати води (б) на річці Південний Буг (1 – р. Південний Буг - с. Пирогівці; 2 – р. Південний Буг - с. Лелітка; 3 – р. Південний Буг - с. Тростянчик; 4 – р. Південний Буг - с. Підгірці; 5 – р. Південний Буг - смт Олександрівка; 6 – р. Синюха - с. Синюхін Брід)

Fig. 2 – Maximum average monthly discharges (a) and mean monthly long-term discharges (b) on the Southern Buh River (1 – Southern Buh River - Pyrohivtsi village; 2 – Southern Buh River - Lelitka village; 3 – Southern Buh River - Trostyanchyk village; 4 – Southern Buh River - Pidhir'ya village; 5 – Southern Buh River - Olexandrivka village; 6 – Synyuha - Synyuhyn Brid village)

Така ситуація пояснюється особливостями формування водного стоку, а саме значним впливом р. Синюха на формування витрат води річки Південний Буг біля смт Олександрівка. Річка Синюха є лівою притокою Південного Бугу, яка впадає у нього за 0,5 км вище від м. Первомайськ. Синюха є найбільшою за площею і водністю притокою Південного Бугу [22].

У місці впадіння її середня водність стано-

вить близько 40 % від загальної водності Південного Бугу. Після впадіння р. Синюхи до Південного Бугу витрати води у його кінцевому гідрологічному створі біля смт Олександрівка майже не змінюються за відсутності суттєвої приточності. Басейн р. Синюха розташовано у лісо-степовій зоні (рис. 1). Період сніготанення на водозборі Синюхи настає раніше і відбувається більш інтенсивніше у порівнянні з частиною басейну Південного Бугу, яка розташована від витoku до поста спостережень біля с. Підгір'я, за рахунок більш високих температур повітря та зменшення лісового покриву. Все це й визначає настання найбільшої водності на річці Синюха саме у березні та її досить вагомий вплив на формування водності р. Південний Буг, про що і

свідчать дані багаторічних спостережень (рис. 2 б).

Порогові значення витрат води, за якими відбувався розподіл характеристик водного стоку на п'ять складових, наведено у табл. 2. Приклад такого розподілу для гідрологічного поста р. Південний Буг – смт Олександрівка наведено на рис. 3.

Після цього у роботі виконано аналіз розрахованих статистичних параметрів за ПНА для таких складових стоку як великі повені, невеликі повені та пульсації високого стоку.

Середні багаторічні, порогові та середні пікові значення витрат води на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг зростають у напрямку від витoku до гирла річки (табл. 1, 2, 3, рис. 4).

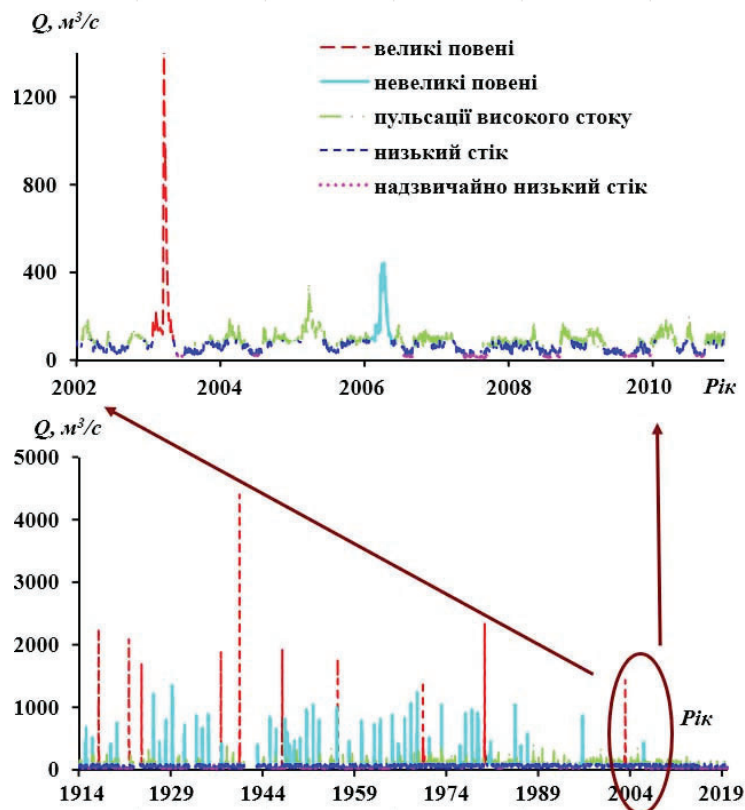


Рис. 3. – Розділення гідрографів за різними характеристиками водного стоку для гідрологічного поста р. Південний Буг - с. Олександрівка (детально за 2002–2010 рр.)

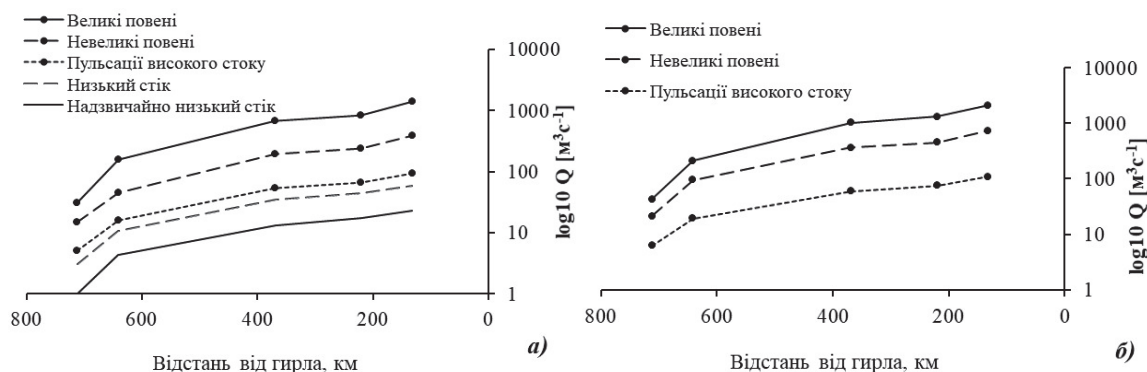
Fig. 3. – Separation of hydrographs into different flow types for gauge station of the Southern Buh River - Olexandrivka village (detail from the years 2002–2010)

Таблиця 2 – Порогові значення витрат води на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$   
Table 2 – Discharge thresholds at gauge stations along the Southern Buh River,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$

Гідрологічний пост	Великі повені	Невеликі повені	Пульсації високого стоку	Низький стік	Надзвичайно низький стік
Пирогівці	$\leq 30,8$	$\leq 14,8$	$\leq 5,10$	$\geq 3,05$	$\geq 1,01$
Лелітка	$\leq 155$	$\leq 44,5$	$\leq 16,0$	$\geq 10,6$	$\geq 4,32$
Тростянчик	$\leq 685$	$\leq 194$	$\leq 53,6$	$\geq 35,2$	$\geq 13,3$
Підгір'я	$\leq 825$	$\leq 235$	$\leq 65,6$	$\geq 44,0$	$\geq 17,4$
Олександрівка	$\leq 1400$	$\leq 394$	$\leq 92,0$	$\geq 58,3$	$\geq 22,8$

**Таблиця 3** – Середні пікові значення витрат води на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$   
**Table 3** – Mean values of the peak discharge at gauge stations along the Southern Buh River,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$

Гідрологічний пост	Великі повені	Невеликі повені	Пульсації високого стоку
Пирогівці	42,9	21,1	6,22
Лелітка	212	95,3	19,4
Тростяничик	1019	367	59,4
Підгір'я	1321	453	75,2
Олександрівка	2121	733	110



**Рис. 4.** – Порогові (а) та середні пікові (б) значення витрат води на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг  
**Fig. 4.** – Discharge thresholds (a) and mean values of the peak discharge (b) at gauge stations along the Southern Buh River

Середня тривалість великих повеней зростає у напрямку від витoku р. Південний Буг до гирла від 32 до 75 діб. Найбільшу тривалість невеликі повені мають у верхів'ї, а на решті річки тривалість перебуває в межах 55-61 діб. Тривалість пульсацій високого також найбільша у верхів'ї та зменшується у напрямку до гирла річки (табл. 4, рис. 5 а).

Великі повені на р. Південний Буг трапляються в середньому один раз на десять років, а невеликі – один раз на два роки. Пульсації високого стоку відбуваються 4-8 раз на рік у верхів'ях річки і 9-14 раз на рік в середній течії (табл. 4, рис. 5 б).

Середні юліанські дати піків великих та невеликих повеней у верхів'ях р. Південний Буг спостерігаються в перших декадах квітня та травня, відповідно, а в середній течії – у третій декаді березня. Пульсації високого стоку вздовж р. Південний Буг спостерігаються в першій-другій декаді липня (табл. 4, рис. 5 в).

Для усіх трьох видів високого стоку інтенсивність росту витрат води на підйомі зростає з наближенням до гирла р. Південний Буг, однак найбільшими темпами зростання характеризуються високі повені, а найменшими – пульсації високого стоку (табл. 5, рис. 6 а). Теж саме стосується і інтенсивності зниження витрат води на спаді високого стоку (табл. 5, рис. 6 б).

**Таблиця 4** – Середня тривалість (доба) / середня частота (кількість випадків/рік) / середні юліанські дати піків (доба) складових водного стоку на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг

**Table 4** – Mean duration (days) / mean frequency (number of cases/year) / mean Julian dates peaks (days) of different flow types at gauge stations along the Southern Buh River

Гідрологічний пост	Великі повені	Невеликі повені	Пульсації високого стоку
Пирогівці	32/0,11/101	104/0,46/128	23/4,13/184
Лелітка	48/0,11/99	57/0,50/108	12/7,71/193
Тростяничик	43/0,10/88	62/0,46/89	9/13,7/195
Підгір'я	55/0,09/89	55/0,45/88	8/12,3/201
Олександрівка	75/0,10/85	61/0,50/83	12/8,85/185

**Таблиця 5** – Інтенсивність росту витрат води на підйомі (чисельник) та інтенсивність зниження витрат води на спаді (знаменник) високого стоку на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг,  $(\text{m}^3/\text{с})/\text{доба}$

**Table 5** – Intensity of discharges increase on rise (numerator) and intensity of discharges decrease on recession (denominator) of high flow at gauge stations along the Southern Buh River,  $[\text{m}^3\text{s}^{-1}/\text{days}]$

Гідрологічний пост	Великі повені	Невеликі повені	Пульсації високого стоку
Пирогівці	4,39 / -2,20	1,27 / -0,75	0,82 / -0,41
Лелітка	25,3 / -5,92	8,67 / -3,03	2,89 / -1,81
Тростяничик	102 / -35,6	34,5 / -12,2	11,4 / -7,93
Підгір'я	112 / -34,8	40,4 / -13,7	13,5 / -8,28
Олександрівка	154 / -48,9	56,0 / -21,7	18,9 / -1,04



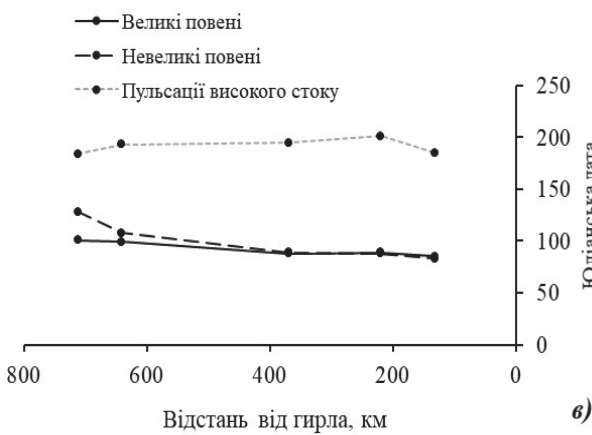
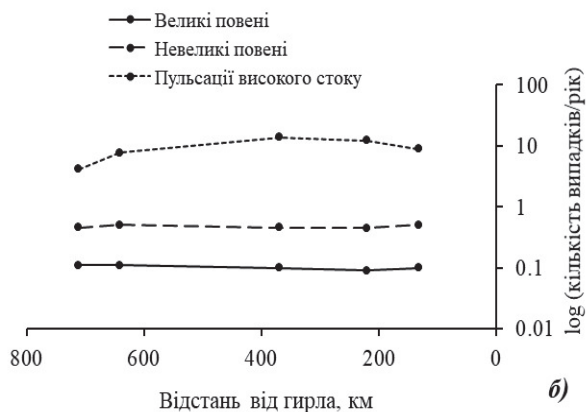
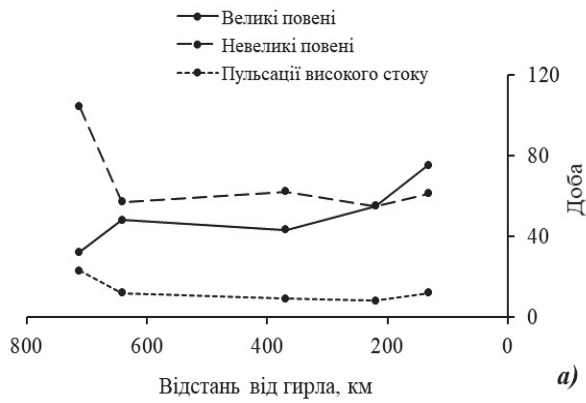


Рис. 5. – Середня тривалість (а), середня частота (б) і середні юліанські дати піків (в) складових водного стоку на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг

Fig. 5. – Mean duration (a), mean frequency (b) and mean Julian dates peaks (c) of different flow types at gauge stations along the Southern Buh River

На рис. 7 наведено зміни з часом характеристик великих повеней на прикладі спостережень на гідрологічних постах у верхів'ї та середній течії р. Південний Буг.

За період спостережень величини максимальних витрат води великих повеней мають тенденцію до зменшення. Разом з цим, тривалість ве-

ликих повеней значно збільшилась. Максимальні витрати великих повеней почали наставати пізніше у верхів'ї річки. Однак, загалом у замикальному створі біля смт Олександрівка дати настання максимальних витрат води великих повеней не зазнали суттєвих змін.

Тенденції характеристик невеликих повеней загалом співпадають з тенденціями великих повеней, окрім величин максимальних витрат біля смт Олександрівка, які з часом не зазнали змін (рис. 8).

Разом з цим, аналіз характеристик пульсацій високого стоку вздовж річки свідчить про відсутність будь яких суттєвих тенденцій з часом (рис. 9). Загалом отримані тенденції високого (максимального) стоку у басейні р. Південний Буг співпадають з тенденціями, які отримано у роботах інших вчених як для басейну р. Південний Буг, так і для інших рівнинних річок України [20, 24, 25]. Особливо це стосується великих повеней. Разом з цим, використання методу ІНА дозволяє деталізувати високий стік і виконати розширений аналіз за багатьма

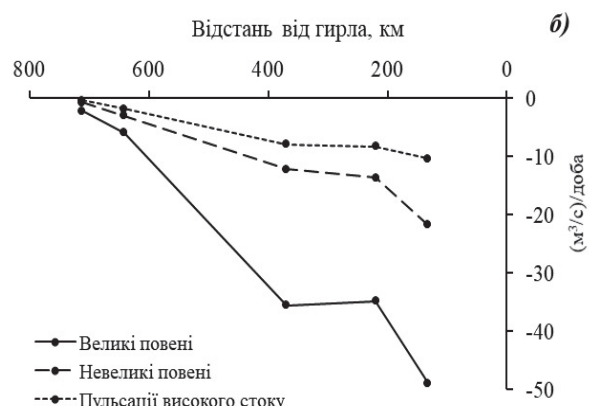
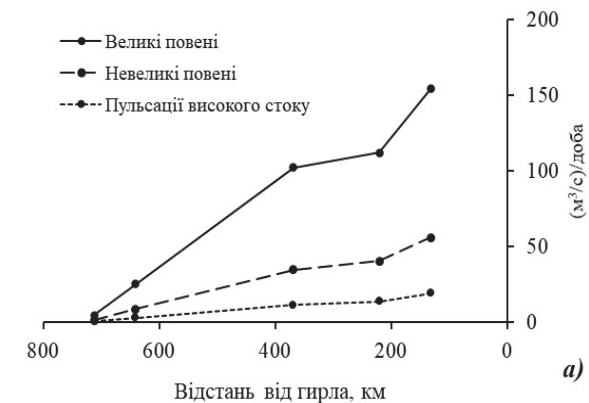


Рис. 6. – Інтенсивність росту витрат води на підйомі (а) та інтенсивність зниження витрат води на спаді (б) високого стоку на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг  
Fig. 6. – Intensity of discharges increase on rise (a) and intensity of discharges decrease on recession (b) of high flow at gauge stations along the Southern Buh River

показниками. Це значно пришвидшує і спрощує дослідження. Окрім цього, це дозволило у даному дослідженні вперше виявити і деякі особливості змін у різних класах високого стоку. Так,

найбільш значимі зміни виявлено для великих повеней, тоді як для пульсацій високого стоку будь-яких суттєвих змін виявлено не було.

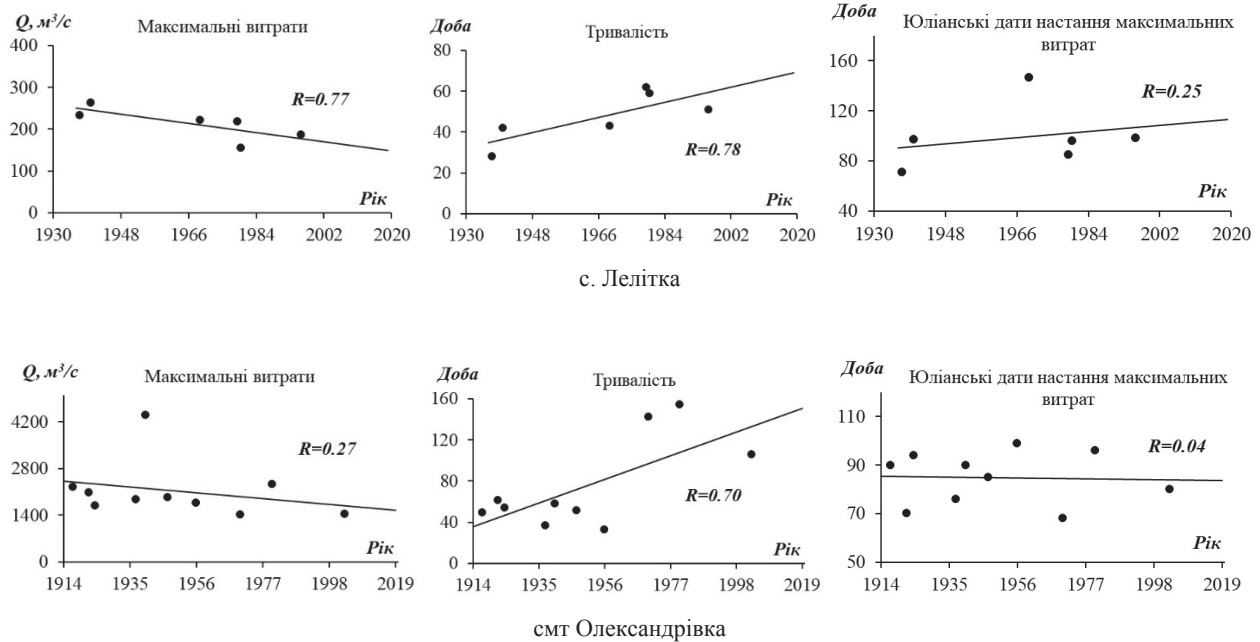


Рис. 7. – Виявлення тенденцій змін характеристик великих повеней вздовж р. Південний Буг

Fig. 7. – Identification of trends in the characteristics of large floods along the Southern Buh River

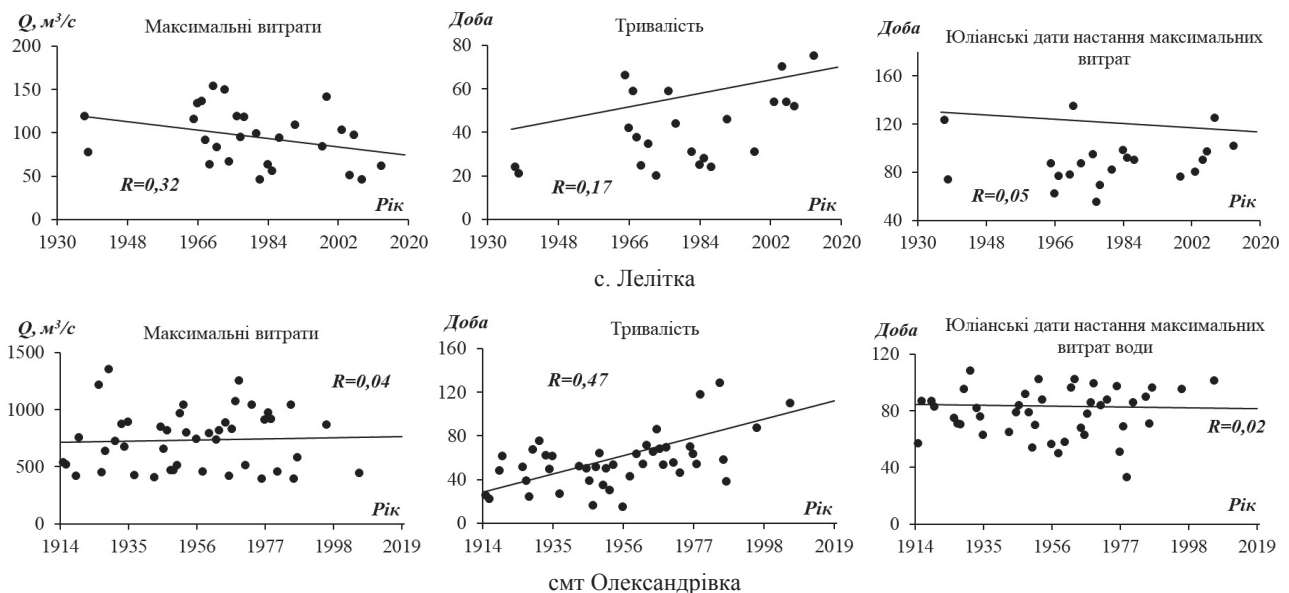


Рис. 8. – Виявлення тенденцій змін характеристик невеликих повеней вздовж р. Південний Буг

Fig. 8. – Identification of trends in the characteristics of small floods along the Southern Buh River

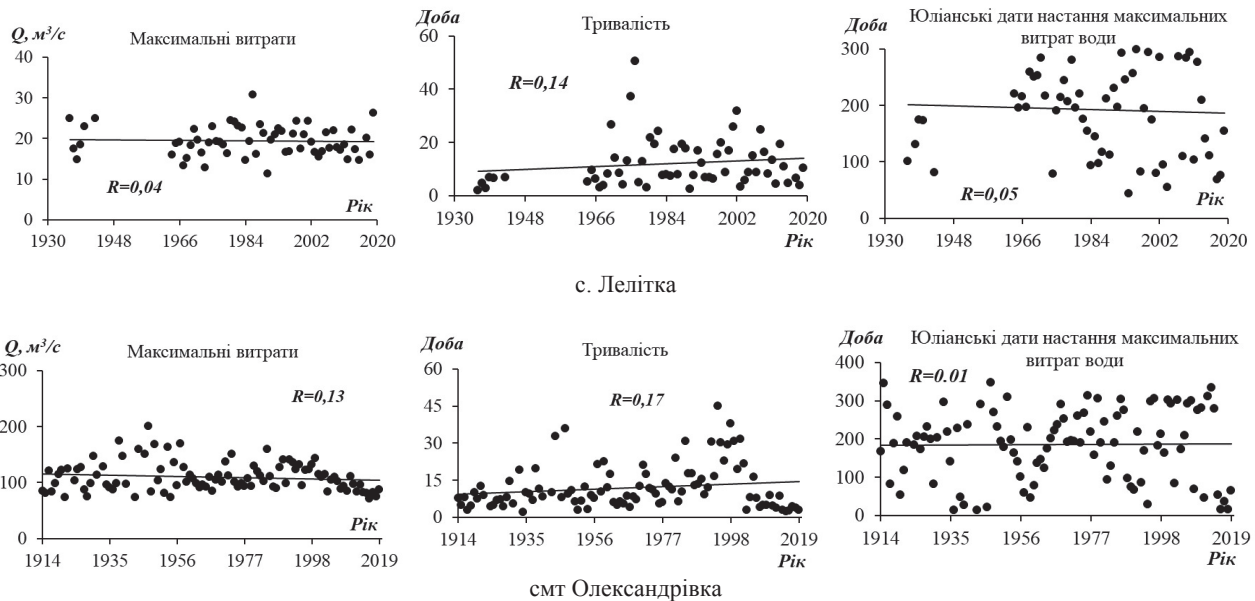


Рис. 9. – Виявлення тенденцій змін характеристик пульсацій високого стоку вздовж р. Південний Буг  
 Fig. 9. – Identification of trends in the characteristics of high-flow pulses along the Southern Buh River

#### 4. ВИСНОВКИ

Метод Indicators of Hydrologic Alteration широко використовується у світі для виявлення та аналізу тенденцій у змінах гідрологічного режиму водних об'єктів. Таким дослідженням присвячена велика кількість наукових робіт, частина з яких розглядалась і в даній роботі. Застосування цього методу для дослідження українських річок вперше дозволило отримати нові знання та розширити уявлення щодо дослідження статистичних показників водного стоку річки Південний Буг.

За допомогою методу ІНА у дослідженні отримано наступні результати:

- Аналіз середньомісячних багаторічних витрат води показав, що настання найбільшої водності р. Південний Буг біля с.т. Олександрівка визначається вагомим впливом її лівої притоки – річкою Синюха.

- Виконано розподіл гідрографів за характеристиками стоку у різні фази водного режиму для 5 гідрологічних постів уздовж річки Південний Буг за розрахованими пороговими значеннями витрат води.

- Значення основних статистичних показників, які розраховано у роботі для високого стоку, поступово зростають у напрямку від витoku до гирла, що повністю відповідає фізико-географічним умовам його формування. Разом з цим, було виявлено і деякі особливості високого стоку. Так, найбільшу тривалість невеликі пове-

ні та пульсацій високого стоку мають у верхів'ї річки.

- У середньому на р. Південний Буг великі повені повторюються 1 раз на 10 років, невеликі – 1 раз на 2 роки, пульсації високого стоку – 4-8 раз на рік у верхів'ї та 9-14 раз на рік у середній течії.

- У верхів'ї річки у середньому за юліанськими датами піки великих повеней спостерігаються в першій декаді квітня, невеликих повеней – першій декаді травня, у середній течії – у третій декаді березня, а пульсації високого стоку вздовж річки – в першій-другій декаді липня.

- Аналіз тенденцій у коливаннях характеристик високого стоку показав, що з часом величини максимальних витрат води великих та невеликих повеней мають тенденцію до зменшення, а їхня тривалість суттєво збільшилася. Виятком є максимальні витрати води невеликих повеней біля с.т. Олександрівка, які з часом не зазнали змін. За період спостережень для характеристик пульсацій високого стоку вздовж річки не виявлено будь яких суттєвих змін.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Linnerooth-Bayer J., Amendola A. Introduction to special issue on flood risks in Europe. *Risk Analysis*. 2003. 23(3). Pp. 537-543. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00334>
2. Blöschl G. et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*. 2017. 357(6351). Pp. 588-590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
3. Гопченко Є. Д., Овчарук В. А. Сучасна методика нормування характеристик максимального стоку

- весняного водопілля рівнинних річок України. *Український географічний журнал*. 2018. № 2. С. 26-33. <https://doi.org/10.15407/ugz2018.02.026>
4. Barroca B. Vulnerability, urban design and resilience management. *Natural Hazards - Risk Assessment and Vulnerability Reduction* / Edited by José Simão Antunes Do Carmo. London: IntechOpen, 2018. Pp. 3-16. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78585>
  5. Assessment of the community vulnerability to extreme spring floods: the case of the Amga River, central Yakutia, Siberia / Tananaev N. I., Efremova V. A.; Gavrilyeva T. N.; Parfenova O. T. *Hydrology Research*. 2020. In press. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.124>
  6. Webster P. J., Jian J. Environmental prediction, risk assessment and extreme events: adaptation strategies for the developing world. *Phil. Trans. Roy. Soc. A (Math, Phys and Eng.)*. 2011. 369. Pp. 1-30. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0160>
  7. Pham N. T. T., Nong D., Sathyan A. R., Garschagen M. Vulnerability assessment of households to flash floods and landslides in the poor upland regions of Vietnam. *Climate Risk Management*. 28. 2020. Pp. 1002152. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100215>
  8. Assessing river flood risk and adaptation in Europe-review of projections for the future / Kundzewicz Z. W. et al. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2010. 15(7). Pp. 641-656. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9213-6>
  9. Floods and climate: Emerging perspectives for flood risk assessment and management / Merz B. et al. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* 2014. 2. Pp. 1559-1612. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1921-2014>
  10. A new flood type classification method for use in climate change impact studies / Turkington T. et al. *Weather and Climate Extremes*. 2016. 14. Pp. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.10.001>
  11. Knighton J., Steinschneider S., Todd Walter M. A. Vulnerability based, bottom up assessment of future riverine flood risk using a modified peaks over threshold approach and a physically based hydrologic model. *Water Resources Research*. 2017. 53. Pp. 10,043-10,064. <https://doi.org/10.1002/2017WR021036>
  12. Tabari H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Nature. Sci. Rep.* 2020. 10(1). Pp. 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
  13. Горбачова Л. Місце та роль гідролого-генетичного аналізу серед сучасних методів дослідження водного стоку річок. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2016. Вип. 268. С. 73-81.
  14. Statistical analysis of hydrological regime of the Danube River at Ceatal Izmail Station / Pekarova P., Gorbachova L., Bacová Mitkova V. et al. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019. 221(012035). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/221/1/012035>
  15. How much water does a river need? / Richter B. et al. *Freshwater Biology*. 1997. 37(1). Pp. 231-249. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>
  16. Development of representative indicators of hydrologic alteration / Gao Y. et al. *Journal of Hydrology*. 2009. 374(1). Pp. 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.009>
  17. Assessment of the degree of hydrological indicators alteration under climate change / Yu C. et al. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017)*. *Advances in Engineering Research (AER)*. Atlantis Press, 2017. Vol. 143. Pp. 210-216.
  18. The nature conservancy indicators of hydrologic alteration. Version 7. User's manual. 2009. 75 p. <https://www.conservancygateway.org/Documents/IHAV7.pdf> (Accessed: 12 February 2021)
  19. Ресурси поверхностних вод СССР. Описание рек и озер и расчеты основных характеристик их режима. Украина и Молдавия. Вып. 2. Срнее и нижнее поднепровье / под ред. М. С. Каганер. Ленинград: Гидрометеиздат, 1967. 492 с.
  20. Шакирзанова Ж. Р. Довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок та естуаріїв території України: монографія. Одеса: ФОП Бондаренко М.О., 2015. 252 с.
  21. Горбачова Л. О., Васильева О. С. Строки та тривалість періодів і сезонів водогосподарського року в басейні річки Південний Буг. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2013. Вип. 265. С. 39-45.
  22. Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу / за ред. В.К. Хільчевського. Київ: Ніка-Центр, 2009. 182 с.
  23. Bauzha T., Gorbachova L. The features of the cyclical fluctuations, homogeneity, and stationarity of the average annual flow of the Southern Buh River basin. *Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series*. 2017. 17(1). Pp. 5-17.
  24. Овчарук В. А. Максимальний стік весняного водопілля річок України: розрахункові моделі та їх реалізація: дис...д-ра. геогр. наук / ОДЕКУ. Одеса, 2017. 568 с.
  25. Горбачова Л. О., Барандіч С. Л. Просторово-часова мінливість максимального стоку води весняного водопілля та паводків змішаного походження річок України. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2016. Вип. 269. С. 107-114.

## REFERENCES

1. Linnerooth-Bayer, J. & Amendola, A. (2003). Introduction to Special Issue on Flood Risks in Europe. *Risk Analysis*, 23(3), pp. 537-543. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00334>
2. Blöschl, G. et al. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), pp. 588-590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
3. Ovcharuk, V.A. & Hopchenko, Ye.D. (2018). [The modern method of maximum spring flood runoff characteristics valuation for the plan rivers of Ukraine]. *Ukr. geogr. ž. [Ukrainian Geographic Journal]*, 2, pp. 26-33. (in Ukr.)
4. Barroca, B. (2018). Vulnerability, Urban Design and Resilience Management. In: José Simão Antunes Do Carmo (eds). *Natural Hazards - Risk Assessment and Vulnerability Reduction*. London: IntechOpen, pp. 3-16. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78585>
5. Tananaev, N.I., Efremova, V.A., Gavrilyeva, T.N., Parfenova, O.T. (2020). Assessment of the community vulnerability to extreme spring floods: the case of the Amga River, central Yakutia, Siberia. *Hydrology Research*. In press. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.124>
6. Webster, P.J. & Jian, J. (2011). Environmental prediction, risk assessment and extreme events: adaptation strategies for the developing world. *Phil. Trans. Roy. Soc. A (Math, Phys and Eng.)*, 369, pp. 1-30. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0160>
7. Pham, N.T.T. et al (2020). Vulnerability assessment of

- households to flash floods and landslides in the poor upland regions of Vietnam. *Climate Risk Management*, 28, pp. 1002152. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100215>
8. Kundzewicz, Z.W. et al. (2010). Assessing river flood risk and adaptation in Europe-review of projections for the future. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(7), pp. 641-656. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9213-6>
  9. Merz, B. et al. (2014). Floods and climate: Emerging perspectives for flood risk assessment and management. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 2, pp. 1559-1612. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1921-2014>
  10. Turkington, T. et al. (2016). A new flood type classification method for use in climate change impact studies. *Weather and Climate Extremes*, 14, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.10.001>
  11. Knighton, J., Steinschneider, S. & Todd Walter, M. (2017). A vulnerability based, bottom up assessment of future riverine flood risk using a modified peaks over threshold approach and a physically based hydrologic model. *Water Resources Research*, 53, pp. 10,043-10,064. <https://doi.org/10.1002/2017WR021036>
  12. Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Nature. Sci. Rep.*, 10(1), pp. 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
  13. Gorbachova, L. (2016). [Place and role of hydro-genetic analysis among modern research methods runoff]. *Naukovi pratsi Ukrainського naukovo-doslidnoho hidrometeorologichnoho instytutu. [Proceedings of Ukrainian Hydrometeorological Institute]*, 268, pp. 73-81. (in Ukr.)
  14. Pekarova, P., Gorbachova, L., Bacová Mitkova, V. et al. (2019). Statistical analysis of hydrological regime of the Danube River at Ceatal Izmail Station. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 221(012035). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/221/1/012035>
  15. Richter, B. et al. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37(1), pp. 231-249. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>
  16. Gao, Y. et al. (2009). Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, 374(1), pp. 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.009>
  17. Yu, C. et al. (2017). Assessment of the degree of hydrological indicators alteration under climate change. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017). Advances in Engineering Research (AER)*. Atlantis Press, vol. 143, pp. 210-216.
  18. *Engineering Research (AER)*. Atlantis Press, vol. 143, pp. 210-216.
  19. *The Nature conservancy indicators of hydrologic alteration* (2009). Version 7. User's manual, 75 p. <https://www.conservationgateway.org/Documents/IHAV7.pdf> (Accessed: 12 February 2021)
  20. Kaganer, M.S. (ed.). (1967). *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Opisanie rek i ozer i raschety osnovnykh kharakteristik ikh rezhima [Resources of surface water of the USSR. Description of rivers and lakes and calculations of the main characteristics of their regime]*. Issue 2: *Ukraina i Moldaviya. Srednee i nizhnee podneprov'e. [Ukraine and Moldova. The Middle and Lower Dnieper]*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russ.)
  21. Shakirzanova, Zh.R. (2015). *Dovhostrokovoe prohnouzuvannia kharakteristik makyimalnoho stoku vesnianoho vodopilia rivnyynykh richok ta estuariiv terytorii Ukrainy [Long-term forecasting of characteristics maximum runoff spring flood plain rivers and estuaries in Ukraine]*. Odesa: FOP Bondarenko M.O. Publ. (in Ukr.)
  22. Gorbachova, L.O. & Vasul'eva O.S. (2013). [Terms and duration of periods and seasons of water economic year in the Southern Bug River Basin]. *Naukovi pratsi Ukrainського naukovo-doslidnoho hidrometeorologichnoho instytutu. [Proceedings of Ukrainian Hydrometeorological Institute]*, 265, pp. 39-45. (in Ukr.)
  23. Khilchevskyi, V.K. (ed.). (2009). *Vodni resursy ta yakist richkovykh vod baseinu Pivdennoho Buhu [Water resources and quality of river waters in the Pivdenny Bug Basin]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
  24. Bauzha, T. & Gorbachova, L. (2017). The features of the cyclical fluctuations, homogeneity, and stationarity of the average annual flow of the Southern Buh river basin. *Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series*, 17(1), pp. 5-17.
  25. Ovcharuk, V.A. (2017). *Maksymalni stik vesnianoho vodopillia richok Ukrainy: rozrakhunkovi modeli ta ikh realizatsiia [Maximum runoff of spring flood on Ukrainian rivers: calculation models and their implementation]*. Thesis of Dr. Sc. in Geography. Odessa State Environmental University. Odesa. (in Ukr.)
  26. Gorbachova, L.O. & Barandich, S.L. (2016). [Spatio-temporal fluctuations of maximum flow of spring floods and snow-rain floods of Ukrainian rivers]. *Naukovi pratsi Ukrainського naukovo-doslidnoho hidrometeorologichnoho instytutu. [Proceedings of Ukrainian Hydrometeorological Institute]*, 269, pp. 107-114. (in Ukr.)

## STATISTICAL ANALYSIS OF MAXIMUM RUNOFF OF THE SOUTHERN BUH RIVER USING THE METHOD OF INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION

L. O. Gorbachova, V. S. Prykhodkina, B. F. Khrystiuk,  
T. O. Zabolotnia, V. O. Rozlach

Ukrainian Hydrometeorological Institute,  
37, Nauky Avenue, Kyiv, 03028, Ukraine,  
gorbachova@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1033-9385>

Knowledge of maximum river runoff trends is of great practical importance, especially for design and operation of hydraulic structures. This article presents the results of the research of the

Southern Buh River's maximum runoff. The water of the river is widely used for hydropower engineering, industrial and municipal water supply, agriculture, irrigation, shipping, tourism etc.

The research of the maximum runoff was based on the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) method which is widely used in the whole world. This method enables calculation of quantitative statistical characteristics of rivers', lakes', reservoirs' runoff and determination of the degree of their hydrological regime changes. The IHA is used for water bodies having natural or regulated runoff. However, the IHA method was not widely used in Ukraine before.

The purpose of this publication is using the Indicators of Hydrologic Alterations method in order to study the characteristics of maximum runoff and their changes along the Southern Buh River.

The research was carried out based on the data of observations at 5 gauge stations located along the Southern Buh River. The research uses the mean daily discharges that has been recorded since the beginning of observations up to 2018 and 2019 inclusive. The river's runoff at each of gauge stations was divided into five components: "Extremely low runoff", "Low runoff", "High runoff pulses", "Small floods", "Large floods". This made it possible to separate three classes of high (maximum) runoff, for which the IHA statistics were calculated, from the total runoff.

It was discovered that the long-term high runoff changes differed in each of its three components, although they had general trends. The most significant changes were found for large floods, with no significant changes found for high runoff pulses. General trends of high runoff showed that over time the values of maximum discharges tend to decrease, with the increasing duration of high runoff periods.

The values of the main statistical indicators of high runoff gradually increase from the river's source to its mouth, which fully corresponds to the physical and geographical conditions of its formation. Nevertheless, some features of high runoff were still found. Thus small floods and high runoff pulses have the largest duration in the upper reach of the river.

On average, the Southern Buh River experiences large floods once in every 10 years, small floods – once in every 2 years, high runoff pulses – 4-8 times a year in its upper reach and 9-14 times a year in its middle reach.

**Keywords:** maximum runoff; the Southern Buh River; statistical analysis; mean daily discharges; the IHA

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА ВОДЫ РЕКИ ЮЖНЫЙ БУГ ПО МЕТОДУ «INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION»

Л. А. Горбачёва, В. С. Приходькина, Б. Ф. Христюк,  
Т. А. Заболотня, В. О. Розлач

Украинский гидрометеорологический институт,  
проспект Науки, 37, г. Киев, 03028, Украина,  
[gorbachova@uhmi.org.ua](mailto:gorbachova@uhmi.org.ua), <https://orcid.org/0000-0003-1033-9385>

Знания о тенденциях максимального стока рек имеют важное практическое значение, особенно для проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений. В данной статье представлены результаты исследования максимального стока реки Южный Буг. Вода реки широко используется для гидроэнергетики, промышленного и коммунального водоснабжения, сельского хозяйства, орошения, судоходства, туризма и т.п.

В работе для исследования максимального стока воды использован метод «Indicators of Hydrologic Alteration» (IHA), который широко применяется в мире. Этот метод позволяет рассчитывать количественные статистические характеристики водного стока рек, озер, водохранилищ и определять степень изменений их гидрологического режима. IHA используют для водных объектов, которые имеют природный или зарегулированный сток. Однако, в Украине метод IHA все ещё не получил широкого распространения.

Целью работы является использование метода «Indicators of Hydrologic Alteration» для

исследования характеристик максимального стока воды и его изменений вдоль реки Южный Буг.

Исследование выполнено по данным наблюдений 5 гидрологических постов, которые расположены вдоль реки Южный Буг. Использовались ежедневные среднесуточные расходы воды с начала наблюдений по 2018 и 2019 гг. включительно. Водный сток реки на каждом гидрологическом посту был разделен на пять составляющих: «*Extreme low flows*» (чрезвычайно низкий сток), «*Low flows*» (низкий сток), «*High-flow pulses*» (пульсации высокого стока), «*Small floods*» (небольшие паводки), «*Large floods*» (большие паводки). Это позволило выделить из общего стока воды три класса высокого (максимального) стока, для которых и были рассчитаны статистические показатели ИНА.

Показано, что долговременные изменения высокого стока отличаются в каждом из трёх его компонентов, хотя и имеют общие тенденции. Наиболее значимые изменения обнаружены для больших паводков, тогда как для пульсаций высокого стока, наоборот, не было выявлено значительных изменений. Общие тенденции высокого стока показывают, что со временем величины максимальных расходов воды имеют тенденцию к уменьшению, а продолжительность периодов с высоким стоком увеличивается.

Значения основных статистических показателей высокого стока постепенно увеличиваются от истока к устью реки, что полностью соответствует физико-географическим условиям его формирования. Тем не менее, обнаружены некоторые особенности высокого стока. Так, наибольшая продолжительность небольших паводков и пульсаций высокого стока наблюдается в верховье реки.

В среднем на р. Южный Буг большие паводки повторяются 1 раз в 10 лет, небольшие – 1 раз в 2 года, пульсации высокого стока – 4-8 раз в год в верховье и 9-14 раз в год в средней части реки.

**Ключевые слова:** максимальный сток; река Южный Буг; статистический анализ; ежедневные расходы воды; ИНА

Подання до редакції : 22. 02. 2021

Надходження остаточної версії : 22. 03. 2021

Публікація статті : 30. 06. 2021

УДК 556.047

## ОЦІНКА ЗМІН ХАРАКТЕРИСТИК СТОКУ ЛІВОБЕРЕЖНИХ ПРИТОК ВЕРХНЬОГО ДНІСТРА В УМОВАХ ПОТЕПЛІННЯ

С. В. Мельник<sup>1</sup>, Н. С. Лобода<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Одеський національний політехнічний університет,  
проспект Шевченка, 1, 65044, Одеса, Україна, [melnik.s.v@opu.ua](mailto:melnik.s.v@opu.ua)

<sup>2</sup> Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [natalie.loboda@gmail.com](mailto:natalie.loboda@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>

Надходження об'ємів води від лівобережних приток Верхнього Дністра є вагомою складовою формування стоку усєї річки. Дослідження змін їх водності в умовах глобального потепління є актуальним і відповідає положенням стратегічної програми в басейні р. Дністер на 2021-2035рр. з питань "пом'якшення наслідків змін клімату" та "просування принципів раціонального використання водних ресурсів".

Метою роботи є дослідження змін кліматичних чинників та характеристик стоку, які відбулися на лівобережжі Верхнього Дністра на початку ХХІ сторіччя.

Дослідження виконано на базі гідрометеорологічних даних за період 1945-2018 рр. Основними методами дослідження є метод регресійного аналізу та різницевих інтегральних кривих.

З'ясовано, що на розглядуваній території відбувається зростання середніх річних температур повітря на фоні незмінних або несуттєво зростаючих сум річних опадів, що забезпечує несприятливі умови формування стоку. Установлено, що у місяці холодного періоду відбувається зростання температур повітря та з 1989 року збільшується частота випадків, коли температура переходить у область додатних значень. 1989 рік є переламним роком у хронологічному ході середніх річних температур повітря; з цього року починається додатна фаза багаторічних коливань. У коливаннях річних сум опадів з середини 60-х років минулого сторіччя до 2013 р. також виділена додатна фаза, у межах якої існував короткий період недостатнього зволоження (1981- 1996 рр.). Виявлено, що реакція характеристик стоку на зміни клімату була неоднаковою. Найбільш чутливим до потепління є максимальний стік весняного водопілля, оскільки за рахунок потепління погіршилися умови накопичення запасів води у сніговому покриві. Перехід коливань максимального стоку у від'ємну фазу відбувся у 1981 році. Середнє багаторічне зменшення максимальних витрат води весняного водопілля за період 1950-2018 рр. становить -16,9 %. На відміну від максимального стоку, характеристики річного і мінімального стоку зимової та літньої межени змінювалися поступово і остаточний перехід у маловодну фазу коливань відбувся лише у 2009-2011 роках. Певну інерцію змін водних ресурсів річок Поділля в умовах потепління забезпечує високий внесок підземної складової у формування річного стоку (60%). Значна частка підземного живлення "пом'якшувала" наслідки втрат поверхневого стоку підчас весняного водопілля. Установлене існування статистично значущих від'ємних трендів у коливаннях річного та мінімального стоку, починаючи з 1998 року. За умови збереження установлених тенденції кліматичних змін приплив води від річок Поділля до головної річки Дністер буде зменшуватися.

**Ключові слова:** лівобережжя Верхнього Дністра; зміни клімату; зміни характеристик річного, максимального та мінімального стоку

### 1. ВСТУП

Проблема, розглянута у статті, полягає у перспективі зменшення водних ресурсів України внаслідок глобального потепління та змін регіонального клімату [1]. Річка Дністер є основним джерелом прісних вод, яке забезпечує населення і економіку республіки Молдова та територію

західної і південно-західної України [2]. Зона формування стоку р. Дністер знаходиться у верхній частині водозбору (Карпати та Волино-Подільська височина). Від водності цієї частини залежить стік усєї річки. Поряд із гірськими притоками, які забезпечують майже 50 % річного об'єму стоку Дністра, внесок лівобережних



(Подільських) приток становить близько 30 % [3]. Частина стоку, яка надходить від нижче розташованих приток (як лівобережних, так і правобережних) у формуванні стоку Дністра не є суттєвою. У зв'язку із цим дослідження змін водності лівобережних приток верхньої частини Дністра, які відбуваються у першій половині XXI сторіччя внаслідок змін клімату, є актуальним і відповідає положенням стратегічної програми в басейні р. Дністер на 2021-2035 рр. з питань “пом'якшення наслідків змін клімату” та “просування принципів раціонального використання водних ресурсів” [4].

*Метою роботи* є дослідження змін кліматичних чинників та характеристик стоку, які відбулися на лівобережжі Дністра на початку XXI сторіччя.

## 2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Детальний розгляд кліматичних умов формування максимального стоку весняного водопілля в басейні Дністра та розроблення методики розрахунків характеристик максимального стоку за метеорологічними даними представлені в монографії Овчарук В.А., Гопченка Є.Д. та Траскової А.В. [5], де відзначене існування від'ємних трендів у хронологічному ході (1945-2010 рр.) максимальних витрат води. За даними Л.О. Горбачової [6] лівобережні Подільські притоки Дністра за внутрішньорічним розподілом віднесені до Дністерсько-Бузького району, де у весняний сезон (III-V) формується основна частина стоку річок. У роботі В.В. Гребіня [7] наведені дані про вирівнювання внутрішньорічного розподілу стоку, коли частка снігового живлення зменшується, а підземного зростає. Дослідження Ж.Р. Шакірзаної в області умов формування максимального стоку весняних водопілля рівнинних річок [8] показали, що “високий весняний стік формується у роки з холодними зимами при значному і стабільному снігонакопиченні, малій водопоглинальній спроможності ґрунтів та інтенсивному сніготаненні... “. Аналіз коливань середньорічного, максимального та мінімального стоку річок басейну Дністра, виконаний К.І. Мудрою [9], дозволив зробити висновки про формування маловодної фази коливань на річках басейну. У попередніх публікаціях авторів представленої статті проблема змін водності річок Поділля розглядалася з точки зору формування наносів [10, 11]. Основна увага була приділена змінам характеристик максимального стоку, оскільки саме він визначає інтенсивність змиву

ґрунтів з поверхні водозбору підчас паводків та водопілля [12]. Пошук трендів у коливаннях місячних та сезонних максимумів стоку показав відсутність певних тенденцій до їх зменшення або зростання на початку XXI сторіччя [13].

Вплив кліматичних чинників на формування стоку рівнинних річок Волино-Подільської височини в літературі освітлений слабо. Однозначної думки з питання сучасних тенденцій змін водного режиму річок басейну Дністра не існує. З'ясування цього питання вимагає постійного оновлення вихідних гідрометеорологічних даних з врахуванням поточних змін клімату і характеристик водного режиму річок.

Представлена стаття присвячена визначенню основних тенденцій у змінах характеристик водного режиму Подільських приток Дністра на базі сучасних гідрометеорологічних даних.

## 3. ОПИС РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі розглянуті лівобережні притоки (від Верещиці до Мурафи) річки Дністер, які беруть початок з Волино-Подільської височини. Більшість річок сформувалася під час танення давніх льодовиків. Талі води промили собі дорогу вздовж лінії глибинних розломів (річки Золота Липа, Серет, Збруч та інші). Річкові долини звужені, глибоко врізані, каньйоноподібні, часто мають заболочені заплави та надзаплавні тераси. Межиріччя переважно пласкі. Підняті ділянки височин складаються з неогенових вапняків [14]. Глибина ерозійного врізу досягає 200-250 м. Леси та лесоподібні відклади служили основою для розвитку чорноземних ґрунтів. Карстовий рельєф представлений карстовими формами – печерами, прокладеними підземними водами.

Розглядувані річки (крім Серета і Збруча) відносяться до малих, площа яких менша 2000 км<sup>2</sup>. Річний стік характеризується високою часткою підземного стоку (до 60%). За даними роботи А.М. Бефані та О.М. Мельничука [15] поверхнева складова сумарного стоку річок у середині минулого сторіччя становила 100-45 мм, зменшуючись у напрямі з північного заходу на південний схід. Підземна складова змінювалася від 130 мм до 50 мм, відповідно. Значна доля підземного стоку забезпечувала високу водність річок у період межені. Внутрішньорічний розподіл характеризується рівномірністю для літнього, осіннього та зимового сезонів (близько 20 % від річного). У середньому на весняний сезон припадає 38 % для Бузько-Дністровської ландшафтно-гідрологічної провінції та до 42 % для Дністровсько-

Дніпровської [7]. У напрямку із північного заходу до південного сходу внесок сезону «весна» у сумарний стік зростає, а частка підземного стоку зменшується. Саме весняний сезон найбільше підлягає впливу змін клімату через зростання температур повітря холодного періоду [13]. Вплив потепління у зимовий сезон на накопичення запасів води у сніговому покриві і формування максимумів весняного водопілля буде суттєвим лише за умови переходу середньомісячної температури повітря у область додатних значень через нуль градусів Цельсію. Якщо ж підвищення температур буде знаходитися у області її від'ємних значень, то наслідки потепління можуть не бути суттєвими. Саме через цю особливість формування стоку річок Поділля різні автори відзначають слабкий відгук їх водних ресурсів на зміни клімату.

#### 4. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі використані матеріали гідрометеорологічних спостережень лівобережної частини Дністра, наданих Центральною Геофізичною Обсерваторією (імені Бориса Срезневського). Основні метеорологічні характеристики розглянуті по метеостанціям Тернопіль та Кам'янець-Подільський. Дані метеостанції Львів використані як додаткова інформація.

Основними методами досліджень є метод регресійного аналізу [16] та різницевої інтегральних кривих. Дані метеорологічних спостережень розглянуті до 2019 року включно, дані гідрологічних спостережень до 2018 р. включно.

За допомогою регресійного аналізу визначалися тенденції змін гідрометеорологічних характеристик та установлювалася статистична значущість коефіцієнтів отриманих регресійних рівнянь та коефіцієнтів кореляції з використанням критерію Стюдента. Значення статистики  $t$  визначається за вибірковими оцінками коефіцієнтів регресії і коефіцієнта кореляції (загальне позначення  $A$ ), віднесеними до середньої квадратичної похибки  $\sigma_A$  їх визначення за вибірковими даними

$$t = \frac{|A_{xy}|}{\sigma_A} \quad (1)$$

і порівнюється з критичним значенням  $t_{кр}$ , котре залежить від числа ступенів свободи

$\nu = n - 1$ , де  $n$  - довжина ряду спостережень й рівня значущості  $q$ .

Коли  $t < t_{кр}$  нульова гіпотеза приймається, а коли  $t > t_{кр}$  - відхиляється, тобто досліджуваний коефіцієнт визнається статистично значущим.

З метою оцінки просторово-часових коливань характеристик стоку та кліматичних чинників його формування, а також виділення додатних і від'ємних фаз їх коливань були побудовані графіки різницевої інтегральних кривих. Такі графічні побудови широко використовують для установлення довготривалих циклів, виявлення синхронності у коливаннях гідрометеорологічних характеристик [17]. Ординати  $f(t)$  цієї кривої є накопиченими у часі послідовними сумами відносних значень (модульних коефіцієнтів) досліджуваної величини від одиниці

$$f(t) = \sum_{t=1}^T (k(t) - 1), \quad (2)$$

де  $T$  - кількість років спостережень,  $k(t) = Q(t)/Q_{сер}$  - модульний коефіцієнт;  $Q(t)$  - значення досліджуваної характеристики у момент часу  $t$ ,  $Q_{сер}$  - середнє значення досліджуваної характеристики за весь період спостережень. Слід зазначити, що середнє арифметичне значення модульного коефіцієнта завжди дорівнює одиниці  $k_{сер} = 1$ .

Період часу, для якого ділянка інтегральної кривої має нахил вгору по відношенню до горизонтальної лінії (осі абсцис) відповідає позитивній (додатній) фазі коливань гідрометеорологічної характеристики. Період часу, для якого ділянка інтегральної кривої має нахил униз по відношенню до горизонтальної лінії відповідає від'ємній фазі.

#### 5. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз довготривалих рядів середньорічних температур повітря і річних сум опадів на метеостанції Тернопіль показав існування статистично значущого додатного тренду у коливаннях температур повітря (рис. 1) і відсутність будь-яких тенденцій у коливаннях опадів (рис. 2). Перевірка статистичної значущості тенденцій за антропогенний період (1945-2019 рр.) показала (табл. 1), що додатні тренди в коливаннях температур повітря є статистично значущими. В коливаннях опадів виявлені тенденції є статистично незначущими.

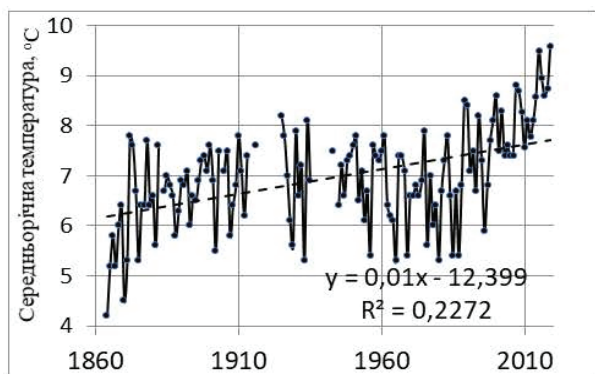


Рис. 1 - Хронологічний хід середніх річних температур повітря, метеостанція м.Тернопіль

Fig. 1 -- Annual air temperature time series, meteorological station in Ternopil

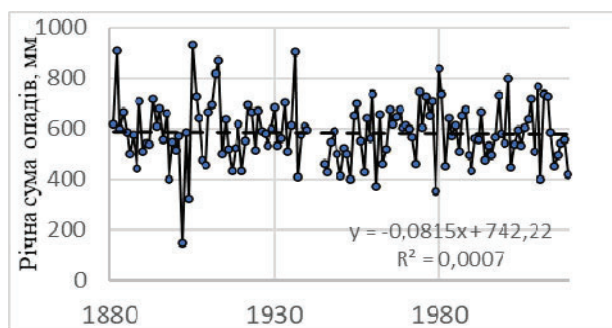


Рис. 2 - Хронологічний хід річних сум опадів по метеостанції м. Тернопіль

Fig 2 - Annual precipitation time series, meteorological station in Ternopil

На різницевих інтегральних кривих (рис. 3) у коливаннях середніх річних температур повітря виділяється один цикл із точкою перегину у 1988 році, що відповідає висновкам В.В. Гребіня [18] про стійкий перехід у додатну фазу середніх річних температур повітря рівнинної України, починаючи з 1989 р.

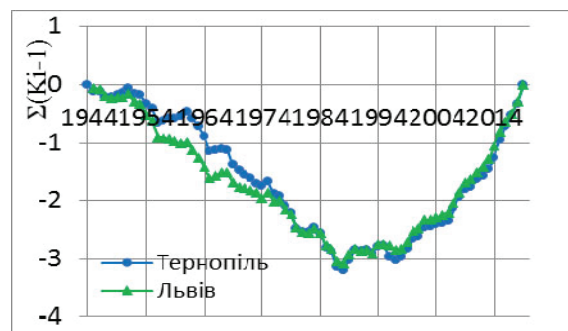


Рис. 3 - Різницева інтегральна крива середньої річної температури повітря по метеостанціям м. Львів і м. Тернопіль

Fig. 3 – Residual mass curve of average annual air temperature on meteorological stations in Lviv and Ternopil

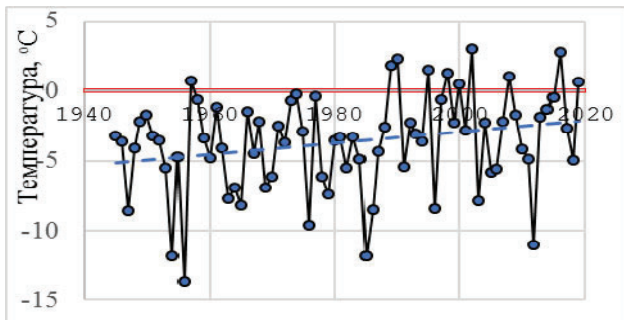
Підчас розгляду середніх місячних температур повітря зимового сезону (XII-II) установлено зростання кількості випадків переходу температури через нуль градусів Цельсія у область додатних значень після 1989 р., що особливо яскраво проявилось у лютому місяці (рис. 4). Якщо до 1989 р. такий перехід спостерігався лише 1 раз, то після 1989 р. – 9 разів.

Таблиця 1 - Рівняння регресії, які описують зміни у часі метеорологічних характеристик за період 1945-2019 рр. та оцінка статистичної значущості коефіцієнтів кореляції (для всіх випадків  $t_{cr}=2,00$ )

Table 1 - Regression equations, describing changes in meteorological characteristics for the period 1945-2019, and assessment of statistical significance of the correlation coefficient (for all cases  $t_{cr}= 2.00$ )

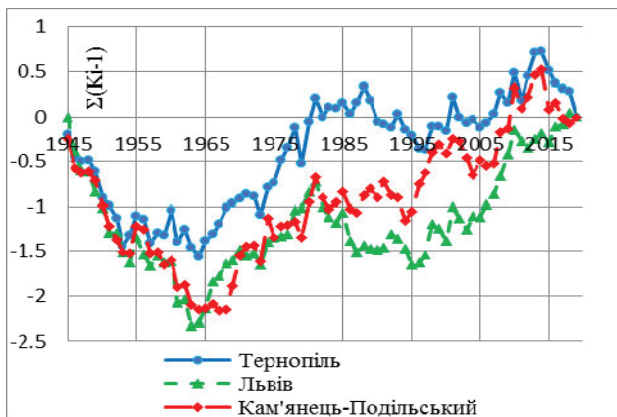
Метеостанція	Вид рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції	Середня квадратична похибка визначення коефіцієнта кореляції	статистика Стьюдента (t)	Висновок щодо існування тренду
Рівняння для сум річних опадів					
Тернопіль	$y=0,486x-387$	0,096	0.115	0,82	Не значущий
Львів	$y= 1,81x-2859$	0,319	0.110	2,87	Значущий
Кам'янець-Подільський	$y=1,17x-1727$	0,220	0,111	1,93	Не значущий
Рівняння для середньорічних температур повітря					
Тернопіль	$y= 0,025x-42,3$	0,545	0.082	5,55	Значущий
Львів	$y= 0,0274x-46,6$	0,632	0.070	6,97	Значущий
Кам'янець-Подільський	$y=0,0303x-51,8$	0,605	0,073	6,40	Значущий

Аналіз різницевої інтегральної кривої середніх сум опадів (рис. 5) за період 1945-2019 рр. показав існування тривалої додатної фази в їх коливаннях, яка розпочалася з середини 60-років минулого сторіччя. За даними метеостанції Львів ця фаза триває. За даними метеостанції Кам'янець-Подільський та Тернопіль додатна фаза закінчилася у 2013 році. На фоні цієї додатної фази можна виділити період недостатнього зволоження, який тривав з 1982 року до середини 90-х.



**Рис. 4** - Багаторічні коливання середньої за лютий місяць температури повітря та лінійний тренд, метеостанція Тернопіль

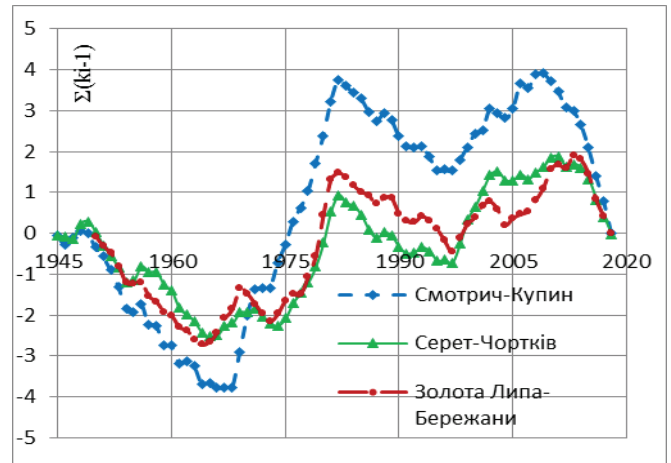
**Fig. 4** - Long-term fluctuations in the average air temperature and the linear trend for February, meteorological station in Ternopil



**Рис. 5** - Різницеві інтегральні криві річних сум опадів по метеостанціям

**Fig. 5** - Residual mass curve of annual precipitation by meteorological stations

Головні особливості багаторічних коливань річних сум опадів повторюються у різницевої інтегральних кривих річного стоку (рис.6). Однак, вплив змін температурного режиму на формування стоку обумовив деякі відмінності. Перехід коливань річного стоку у багатоводну фазу



**Рис. 6** - Різницеві інтегральні криві річного стоку на річках Смотрич, Серет та Золота Липа

**Fig. 6** - Residual mass curve annual flow on the rivers Smotrich, Seret and Zolota Lipa

відбувся у 60-ті роки минулого сторіччя, що відповідає коливанням опадів. Однак виявлене для опадів маловіддя у період 1982-1997 рр. у коливаннях річного стоку виражене набагато сильніше ніж в опадах. Кінець багатоводної фази наступив раніше ніж в опадах. Точка перегину і перехід після багатовіддя у маловодну фазу відбувся раніше - у 2009-2010 роках.

Вид різницевої інтегральної кривої мінімального стоку літньої межні (рис. 7) повторює хід відповідної кривої річного стоку. Для зимової межні початок додатної фази настав дещо пізніше ніж для річного - у 70-х роках минулого сторіччя). Як і у коливаннях річного стоку перехід коливань характеристик мінімального стоку у маловодну фазу відбувся у 2010-2011 роках.



**Рис. 7** - Різницеві інтегральні криві літніх і зимових мінімальних середньомісячних витрат, р. Серет-м.Чортків

**Fig. 7** - The residual mass curves of the summer and winter minimum average monthly discharges in Seret (Chortkiv site)

Що стосується змін максимального стоку річок Поділля, то авторами у роботі [19] показано, що перехід у від'ємну фазу коливань цієї важливої характеристики відбувся набагато раніше, ще у 1981 році, і продовжується до сьогодні (рис. 8).

Аналіз хронологічних графіків показав, що у ході характеристик річного та мінімального стоку виділяється статистично значущий тренд, починаючи з 1998 року (рис. 9, 10, 11). У хронологічному ході добових максимумів весняного водопілля відзначається їх зменшення з початку 80-х років минулого століття (рис. 12, табл. 2).

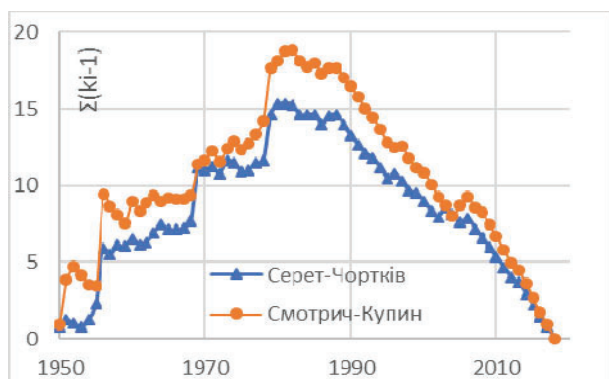


Рис. 8 - Різницеві інтегральні криві максимальних витрат  
Fig. 8 - Residual mass curves of the maximum river discharge

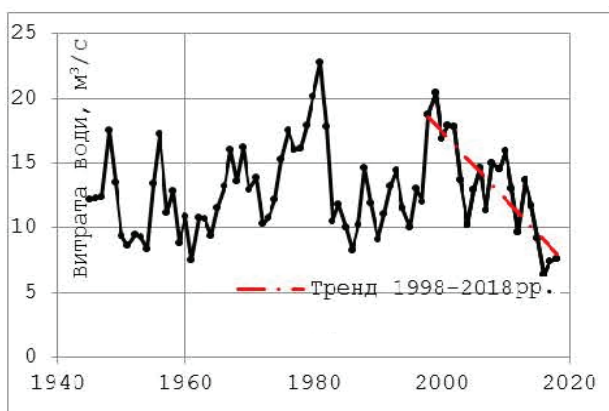


Рис. 9 - Багаторічні коливання річного стоку та лінійний убутний тренд (1998-2018) р. Серет-м. Чортків

Fig. 9 - Long-term fluctuations of the annual runoff discharges and the declining linear trend (1998-2018) in Seret (Chortkiv site)

## 6. ОБГОВОРЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

У роботі В.В. Гребіня [20], присвяченій оцінці змін стоку води і наносів лівобережних приток Дністра у період 1983-2000 рр., зроблений висновок про “зменшення частки весняного стоку води і наносів при збільшенні частки стоку

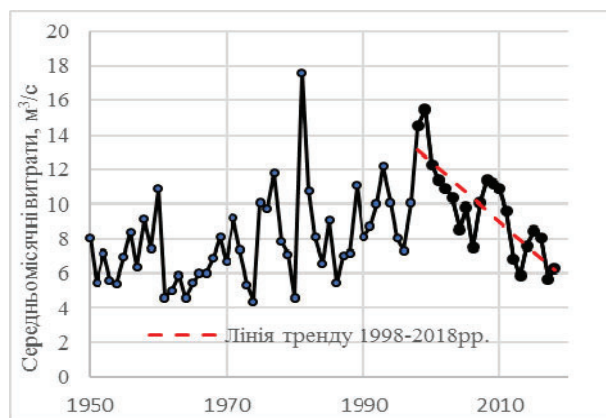


Рис. 10 - Багаторічні коливання мінімальних зимових середньомісячних витрат та убутний лінійний тренд (1998-2018), р. Серет- м.Чортків

Fig. 10 - Long-term fluctuations of the the minimum winter average monthly discharges and the declining linear trend (1998-2018) in Seret (Chortkiv site)

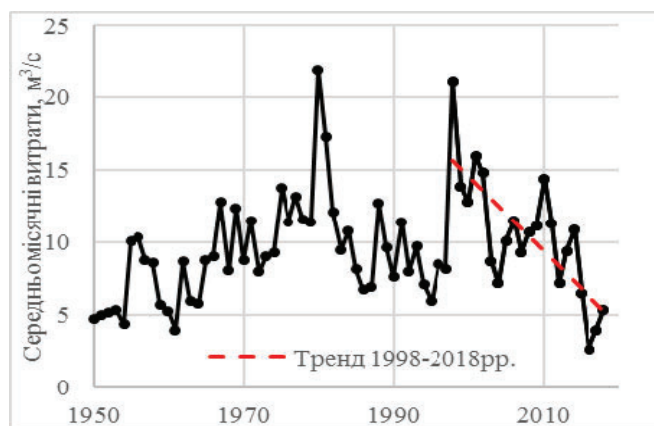


Рис. 11 – Багаторічні коливання мінімальних літніх середньомісячних витрат та лінійний убутний тренд, р. Серет-Чортків

Fig. 11 - Long-term fluctuations of the minimum summer average monthly discharges and the declining linear trend (1998-2018) in Seret (Chortkiv site)

у всі інші сезони року, що супроводжується зростанням мінімального стоку”.

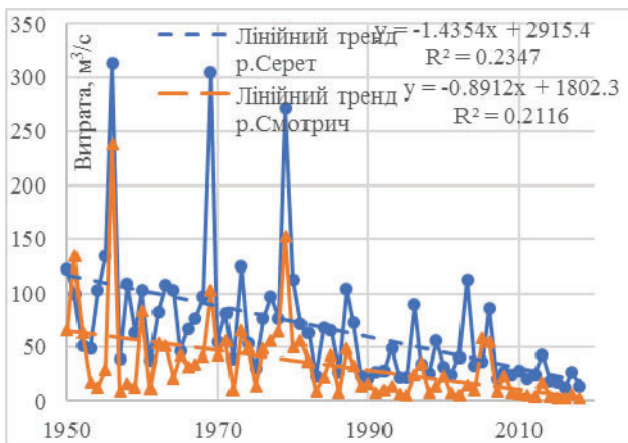
Аналіз рядів характеристик стоку за період спостережень, продовжений на 18 років (до 2018 р.) показав, що виявлені тенденції продовжуються для річного і максимального стоку. Що стосується мінімального стоку, то з кінця 90-х почалося його зменшення, що може бути обумовлено зниженням рівнів підземних вод в результаті потепління.

Оцінка змін кліматичних чинників формування стоку лівобережного Дністра, виконана за даними спостережень, підтверджує прогнози змін середніх річних температур повітря та річ-

**Таблиця 2** – Динаміка змін щорічних максимальних витрат весняного водопілля, розглянута по десятирічках, р. Серет-м. Чортків

**Table 2** - Dynamics of changes in mean spring flood discharges per decade (%) in Seret (Chortkiv site)

Десятиріччя	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2018
Осереднені по десятирічках максимальні щорічні витрати весняного водопілля, м <sup>3</sup> /с	106	98	97	54	38,4	43,3	22,4
Зміни максимальних витрат, %		-8,23	-1,25	-44,1	-29,6	12,8	-48,3
Середня зміна за десятиріччя, %	-16,9						



**Рис.12** - Багаторічні коливання максимальних витрат весняного водопілля р. Серет-м.Чортків, р.Смотрич-с.Купин

**Fig. 12** - Long-term fluctuations of the maximum discharge of the spring flood and the declining linear trends in the Seret-Chortkiv and Smotrych-Kupin rivers

них сум опадів, наданих для періоду 2001-2040 рр. за моделлю WaterGap2 за даними сценарію RCP8.5 у роботі [21]. У цій роботі відзначається, що підвищення температури повітря на фоні невеликого зменшення та помірного збільшення опадів (від -5 до +10 %) призведе до зменшення максимального стоку річок у період весняного водопілля.

У роботі авторів ЄС [22] досліджувана територія також віднесена до таких, де спостерігається стійка тенденція до зменшення максимального стоку зимового сезону. Кількісна характеристика змін максимального стоку по десятиріччях надана в роботі [23], де зазначається, що на досліджуваній території зменшення максимального стоку у середньому становить “мінус” 10-15 % на десятиріччя, якщо розглядати період 1960-2010 рр. Згідно із нашими результатами зменшення максимального стоку за десятиріччя складає мінус 16,9% при розгляді багаторічного періоду 1951-2018рр. (табл.2). Що стосується інших характеристик стоку (річний, мінімальний

зимовий та літній), то до 2010 року їх приріст по десятиріччях є позитивним і лише з 2011 року набуває від’ємних значень.

## 7. ВИСНОВКИ

Установлено, що характер коливань річного стоку річок Поділля у минулому сторіччі визначався, головним чином, загальним зволоженням території: коливання річних сум опадів відбувалися синфазно. Роль термічного режиму у формуванні стоку через його інертність залишалася майже незмінною.

На початку ХХІ сторіччя внаслідок впливу потепління зростає роль температур повітря як одного з головних кліматичних чинників формування стоку. Особливо впливовим є зростання температур повітря зимового гідрологічного сезону, яке супроводжується їх переходом через нуль градусів Цельсія у область додатних значень. Ця обставина призводить до зменшення глибини промерзання ґрунтів, зменшення запасів води у сніговому покриві перед початком весняного водопілля, сприяє формуванню зимових паводків, що негативно впливає на максимальний стік весняного водопілля. Зростання температури повітря у інші сезони року обумовлює збільшення втрат на випаровування і виснаження запасів підземних вод.

Зміни клімату на території лівобережних приток Дністра на початку ХХІ сторіччя проявляються у виді зростання температур повітря (починаючи з 1989 року) та статистично незначущому збільшенні річних опадів. У зимові місяці (насамперед, лютому місяці), починаючи з 1989року, збільшилася кількість випадків переходу температури повітря через нуль градусів Цельсія.

Результатом кліматичних змін стало зменшення річного, мінімального та максимального стоку досліджуваних річок. Негативна реакція водозборів на потепління почала проявлятися

з 1998 року, починаючи з якого у хронологічному ході річного, мінімального зимового та мінімального літнього стоку виявився статистично значущий від'ємний тренд. Перехід у маловодну фазу коливань цих характеристик відбувся у 2009 – 2010 рр.

Що стосується коливань максимального стоку весняного водопілля, то статистично значущий від'ємний тренд сформувався ще з 1981 року. Наприклад, за даними р. Серет – м. Чортків середнє багаторічне зменшення витрат весняного водопілля за кожне десятиріччя періоду 1950-2018 рр. становить “мінус” 16,9 %.

Значний внесок підземного стоку з водозборів розглядуваної території забезпечував стабільність характеристик річного та мінімального стоку. Із зростанням посушливості клімату ці характеристики водності почали зменшуватись.

За умови збереження установлених тенденцій кліматичних змін приплив води від річок Поділля до головної річки Дністер буде зменшуватися.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату: колективна монографія / Одеський державний екологічний ун-т; за ред. С. М. Степаненка, А. М. Польового. Одеса : ТЕС, 2018. 548 с.
- Bo Libert. Joint and coordinated monitoring of transboundary rivers, frameworks, opportunities and bottlenecks – the example of the Dniester River. *Hydropower Impact on River Ecosystem Functioning. Proceeding of the International Conference. Eco-Tiraspol*. International Association of River Keepers, Tiraspol, Moldova, October 8-9, 2019. Pp. 212-216.
- Гідрохімічний режим та якість поверхневих вод басейну Дністра на території України / Хільчевський В. К., Гончар О. М., Забокрицька М. Р. та інш. Київ : Нікацентр, 2013, 256 с.
- Strategic Action Programme for the Dniester River Basin 2021-2035. Chisinau – Kyiv, 2021. 68 p. Стратегическая программа действий для бассейна р.Днестр. Кишинев - Киев, 2020. URL: <https://dniester-commission.com/novosti/podpisano-sovmestnoe-zayavlenie-o-strategicheskoy-programme-dejstvij-po-bassejnu-reaki-dnestr-na-2021-2035-gg> (дата обращения: 21.04.2021)
- Овчарук В. А., Гопченко С. Д., Траскова А. В. Нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні річки Дністер. Харків : ФОП Панов, 2017. 252 с.
- Горбачова Л. О. Сучасний внутрішньорічний розподіл стоку річок України. *Український географічний журнал*. 2015. №3. С. 16-23.
- Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) : монографія. Київ : Ніка-центр, 2010. 316 с.
- Шакірманова Ж. Р. Довгострокові прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок та естуаріїв території України. Одеса : ФОП Бондаренко М.О., 2015. 252 с.
- Мудра К. В. Аналіз багаторічної динаміки коливань стоку Дністра та його приток. *Фізична географія та геоморфологія*. 2018. Вип.3(91). С. 15-20.
- Мельник С. В., Лобода Н. С. Разработка методики расчета стока наносов верхнего и среднего Днестра. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. №18. С. 121- 131. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.14>
- Мельник С. В., Лобода Н. С. Сток наносов Днестра в условиях измененной климата. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. №3 (54). С.63-64.
- Мельник С. В., Лобода Н. С. Динамика наносов верхнего и среднего Днестра в условиях антропогенной нагрузки и изменения климата : монография. Одесса : ТЭС, 2019. 294 с.
- Melnyk S., Loboda N. Trends in monthly, seasonal and annual fluctuations in flood peaks for upper Dniester River. *Meteorology, Hydrology and Water Management*. 2020. 8 (2). Pp. 28-36. <http://doi.org/10.26491/mh/126705MHW-00136-2020-03>.
- Камзіст Ж. С., Шевченко О. Л. Гідрологія України : навчальний посібник. Київ : Інкос, 2009. 612 с.
- Бефани А. Н., Мельничук О. Н. Расчет нормы стока временных водотоков и горных рек Украинских Карпат. *Труды УкрНИГМИ*. 1967. Вып. 69. С. 105-131.
- Лобода Н. С. Методи статистичного аналізу у гідрологічних розрахунках і прогнозах : навчальний посібник. Одеса : Екологія, 2010. 184 с.
- Tetiana Zabolotnia, Liudmyla Gorbachova, Borys Khrystiuk. Estimation of the long-term cyclical fluctuations of snow-rain floods in the Danube basin within Ukraine. *Meteorology Hydrology and Water Management*. 2019. 7 (2). Pp. 3-12.
- Гребінь В. В. Географо-гідрологічний аналіз як метод досліджень сучасних змін водного режиму річок. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2006. Т. 9. С. 17–30.
- Melnyk S., Loboda N. Maximum flow of rivers of the Ukrainian Carpathians (in the upper Dniester) in the climate change conditions. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2018. 10(3). Pp.357-375. URL: <http://jfas.info/psjfas/index.php/jfas/article/view/2557> (Accessed: 21.04.2021).
- Гребінь В. В. Внутрірічний розподіл стоку води і наносів лівобережних приток Дністра та його сучасні зміни. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2005. Т.7. С. 133-143.
- Climate change impact on water availability of main water rivers basins in Ukraine / Didovets I. et al. *Journal of Hydrology. Regional studies*. 2020. 32. Article100761.
- Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment / Hall J., Arheimer B., Borga M. et al. *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2014. 18. Pp. 2735–2772. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-18-2735-2014>.
- Changing climate both increases and decreases European river floods / Blöschl G., Hall J., Viglione A. et al. *Nature*. 2019. 573. Pp. 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>

## REFERENCES

- Stepanenko, S.M. & Polovyi, A.M. (eds). (2018). Klimatychni ryzyky funkcionuvannia haluzei ekonomiky Ukrainy v umovakh zminy klimatu [Climatic risks of functioning of branches of economy of Ukraine in the conditions of climate change]. Odessa: TES Publ. (in Ukr.)

2. Bo Libert. (2019). Joint and coordinated monitoring of transboundary rivers, frameworks, opportunities and bottlenecks – the example of the Dniester river. *Hydropower Impact on River Ecosystem Functioning. Proceeding of the International Conference*. Eco-TirasP. International Association of River Keepers, Tiraspol, Moldova, October 8-9, pp. 212-216.
3. Khilchevskiy, V.K., Honchar, O.M., Zabokrytska, M.R. et al. (2013). *Hidrokhimichniy rezhym ta yakist poverkhnevnykh vod baseinu Dnistra na terytorii Ukrainy [Hydrochemical regime and surface water quality of the Dniester basin on the territory of Ukraine]*. Kyiv: Nikatsentr, Publ. (in Ukr.)
4. Strategic action programme for the Dniester River basin 2021-2035. (2021). Chisinau - Kyiv. Strategicheskaya programa deystviy dlya baseyna r. Dnestr. Kishinev. Kiev, 2020. Available at: <https://dniester-commission.com/novosti/podpisano-sovmestnoe-zayavlenie-o-strategicheskoy-programme-dejstvuj-pobassejnu-reaki-dnestr-na-2021-2035-gg>, (Accessed: 21.04.2021). (in Russ.)
5. Ovcharuk, V.A., Hopchenko, Ye.D. & Traskova, A.V. (2017). *Normuvannya kharakterystyk maksimalnogo stoku vesnianoho vodopillia v baseini richky Dnister [Rationing of the characteristics of the maximum runoff the spring flood in the Dniester River basin]* Kharkiv: FOP Panov Publ. (in Ukr.)
6. Horbachova, L.O. (2015). Suchasnyi vnutrishnorichniy rozpodil stoku richok Ukrainy. [Modern annual distributing of discharge rivers of Ukraine] *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal [Ukrainian geographical magazine]*, 2015, 3, pp. 16-23. (in Ukr.)
7. Hrebin, V.V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrainy (landshaftno-hidrolohichnyi analiz) [Modern water regime of rivers of Ukraine (landscape-hydrological analysis)]*. Kyiv: Nika-tsentr Publ. (in Ukr.)
8. Shakirzanova, Zh.R. (2015). *Dovhostrokovyi prohozuvannya kharakterystyk maksimalnogo stoku vesnianoho vodopillia rivnynykh richok ta estuariiv terytorii Ukrainy. [Long-term prognostications of descriptions of maximal discharge of spring tide of the flat rivers and estuaries of territory of Ukraine]* Odesa: FOP Bondarenko Publ. (in Ukr.)
9. Mudra, K.V. (2018). Analiz bahatorichnoi dynamiky kolyvan stoku Dnistra ta yoho pryток. [Analysis of long-term dynamics of vibrations of discharge of Dnestr and its influses]. *Fizychna heohrafiya ta heomorfolohiia [Physical geography and geomorphology]*, 3(91), pp. 15-20. (in Ukr.)
10. Melnyk, S.V. & Loboda, N.S. (2016). Razrabotka metodiki rascheta stoka nanosov verkhnego y srednego Dnestra [Development of a methodology for calculating the sediment runoff of the upper and middle Dniester]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, №18, pp.121-131. (in Russ.) <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.14>
11. Melnyk, S.V. & Loboda, N.S. (2019). Stok nanosov Dnestra v usloviyakh izmeneniy klimata [Dniester sediment runoff under climate change conditions]. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia. [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 3 (54), pp.63-64. (in Russ.)
12. Melnyk, S.V. & Loboda, N.S. (2019). *Dinamika nanosov verkhnego i srednego Dnestra v usloviyakh antropogennoy nagruzki i izmeneniya klimata [Dynamics of sediments of the upper and middle Dniester under anthropogenic load and climate change]*. Odessa: TES Publ. (in Russ.)
13. Melnyk, S. & Loboda, N. (2020). Trends in monthly, seasonal and annual fluctuations in flood peaks for upper Dniester River. *Meteorology, Hydrology and Water Management*, 8 (2), pp. 28-36. [http://doi.org/10.26491/mh/126705\\_MHWM-00136-2020-03](http://doi.org/10.26491/mh/126705_MHWM-00136-2020-03).
14. Kamzist, Zh.S. & Shevchenko, O.L. (2009). *Hidroheolohiia Ukrainy [Hydrogeology of Ukraine]*. Kyiv: Inkos Publ. (in Ukr.)
15. Befany, A.N. & Melnychuk, O.N. (1967). Raschyot normy stoka vremennykh vodotokov i gornyykh rek Ukrainskikh Karpat [Calculation of the flow rate of temporary streams and mountain rivers of the Ukrainian Carpathians]. *Trudy UkrNYHMY [Proceedings UkrSRHMI]*, 69, pp. 105-131. (in Russ.)
16. Loboda, N.S. (2010). *Metody statystychnoho analizu u hidrolohichnykh rozrakhunkakh i prohozakh. [Methods of statistical analysis in hydrological calculations and forecasts]*. Odesa: Ekolohiia Publ. (in Ukr.)
17. Tetiana Zabolotnia, Liudmyla Gorbachova & Borys Khrystiuk. (2019). Estimation of the long-term cyclical fluctuations of snow-rain floods in the Danube basin within Ukraine. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 7 (2), pp. 3-12.
18. Hrebin, V.V. (2006). Heohrafo-hidrolohichnyi analiz yak metod doslidzhen suchasnykh zmin vodnoho rezhymu richok [Geographic and hydrological analysis as a method of research of modern changes in the water regime of rivers]. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia, [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 9 pp. 17–30. (in Ukr.)
19. Melnyk, S. & Loboda, N. (2018). Maximum flow of rivers of the Ukrainian Carpathians (in the upper Dniester) in the climate change conditions. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 10(3), pp. 357-375. Available at: <http://jfas.info/psjfas/index.php/jfas/article/view/2557> (Accessed: 21.04.2021).
20. Hrebin, V.V. (2005). Vnutryrichnyi rozpodil stoku vody i nanosiv livoberezhnykh pryток Dnistra ta yoho suchasni zminy [Intra-annual distribution of water runoff and sediments of the left-bank tributaries of the Dniester and its current changes]. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology]*, 7, pp.133-143. (in Ukr.)
21. Didovets, I., Krusanova, V., Fattermann, F. et al. (2020). Climate change impact on water availability of main water rivers basins in Ukraine. *Journal of Hydrology. Regional studies*, 32, article 100761.
22. Hall, J., Arheimer, B., Borga, M. et al. (2014). Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, pp. 2735–2772. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2735-2014>.
23. Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A. et al. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573, pp.108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>



## **ASSESSMENT OF RUNOFF CHARACTERISTICS CHANGES OF THE LEFT BANK TRIBUTARIES OF THE UPPER DNIESTER UNDER WARMING CONDITIONS**

**Melnyk S. V.<sup>1</sup>, Loboda N. S.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Odessa National Polytechnic University,  
1 Shevchenko Avenue, 65044, Odesa, Ukraine, melnik.s.v@opu.ua*

<sup>2</sup> *Odessa State Environmental University,  
15 Lvivska Street, 65016, Odesa, Ukraine, natalie.loboda@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>*

The inflow of water from the left-bank tributaries of the Upper Dniester is an important component of the runoff formation for the whole river. The study of changes in their water content in the context of global warming is quite urgent and agrees with the provisions of the strategic programme for the Dniester Basin for 2021-2035 aimed at 'climate change mitigation' and 'promoting the principles of sustainable water management'.

The paper's objective is to carry out a research into the changes in climatic factors and runoff characteristics that occurred on the left bank of the Upper Dniester in the early 21<sup>st</sup> century.

The research was performed on the basis of hydrometeorological data for the period of 1945-2018. The main research methods include the regression analysis and the method of differential integral curves.

It is found that, within the area under study, there is an increase in average annual air temperatures against the background of constant or insignificantly increasing amounts of annual precipitation, thus creating unsatisfactory conditions for runoff formation. It is established that, during the months of cold period, there is an increase in air temperature and that since 1989 the frequency of cases, when the temperature crosses the range of positive values, keeps increasing. 1989 is a turning point in the chronological course of average annual air temperatures; a positive phase of long-term fluctuations starts since that year. With regard to annual precipitation fluctuations from the mid-60s of the last century up to 2013, a positive phase was also identified; within this phase there was a short period of insufficient moisture (1981-1996). It was found that the response of runoff characteristics to climate change was not the same. Maximum runoff during the spring flood is the most sensitive to global warming, since such warming has worsened the conditions for accumulation of water reserves in the snow cover. The transition of maximum runoff fluctuations to the low-water phase took place in 1981. The average long-term decrease in the maximum water flow rates during the spring flood for the period of 1950-2018 amounts to -16.9%. Unlike maximum runoff, the characteristics of the annual and minimum runoff changed gradually during the winter and summer low-water periods and the final transition to the low-water phase of fluctuations occurred only in 2009-2011. Certain inertia of changes in the water resources of Podillya rivers under the warming conditions is caused by the subsurface component making a high contribution to the annual runoff formation (60%). Significant portion of the groundwater supply 'mitigated' the effects of surface runoff loss during spring floods. The research allowed establishing the occurrence of statistically significant negative trends in the annual and minimum runoff fluctuations since 1998. If continue to preserve, the identified climate change trends will decrease the inflow of water from the Podillya rivers to the main Dniester River.

**Keywords:** left bank of the Upper Dniester; climate changes; changes in the characteristics of annual, maximum and minimum runoff

## **ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА ЛЕВОБЕРЕЖНЫХ ПРИТОКОВ ВЕРХНЕГО ДНЕСТРА В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ**

**С. В. Мельник<sup>1</sup>, Н.С. Лобода<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Одесский национальный политехнический университет,  
проспект Шевченко, 1, 65044, Одесса, Украина, melnik.s.v@opu.ua*

<sup>2</sup> *Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, natalie.loboda@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>*

Поступление объемов воды от левобережных притоков верхнего Днестра является весомой составляющей формирования стока всей реки. Исследование изменений их

водности в условиях глобального потепления является актуальным и отвечает положению стратегической программы бассейна р. Днестр на 2021-2035 гг. по вопросам “смягчения последствий изменений климата” и “продвижения принципов рационального использования водных ресурсов”.

Целью работы является исследование изменений климатических факторов и характеристик стока, которые произошли на левобережье Верхнего Днестра в начале XXI столетия.

Исследование выполнено на базе гидрометеорологических данных за период 1945-2018 гг. Основными методами исследования является метод регрессионного анализа и разностных интегральных кривых.

Выяснено, что на рассматриваемой территории происходит рост средних годовых температур воздуха на фоне неизменных или несущественно растущих сумм годовых осадков, что обуславливает неблагоприятные условия формирования стока. Установлено, что в месяцах холодного периода происходит рост температур воздуха и с 1989 года увеличивается частота случаев, когда температура переходит в область положительных значений. 1989 год является переломным годом в хронологическом ходе средних годовых температур воздуха; с этого года начинается положительная фаза многолетних колебаний. В колебаниях годовых сумм осадков с середины 60-х годов прошлого столетия до 2013 г. также выделена положительная фаза, в пределах которой существовал короткий период недостаточного увлажнения (1981- 1996 гг.). Обнаружено, что реакция характеристик стока на изменения климата была неодинаковой. Наиболее чувствительным к потеплению является максимальный сток весеннего водополья, поскольку за счет потепления ухудшились условия накопления запасов воды в снежном покрове. Переход колебаний максимального стока в отрицательную фазу произошел в 1981 году. Среднее многолетнее уменьшение максимальных расходов воды весеннего водополья за период 1950-2018 гг. составляет -16,9%. В отличие от максимального стока характеристики годового и минимального стока зимней и летней межени изменялись постепенно и окончательный переход в маловодную фазу колебаний состоялся лишь в 2009-2011 годах. Определенную инерцию изменений водных ресурсов рек Подолии в условиях потепления обеспечивает высокий вклад подземной составляющей в формирование годового стока (60 %). Значительная часть подземного питания “смягчала” последствия потерь поверхностного стока во время весеннего половодья. Установлено существование статистически значимых отрицательных трендов в колебаниях годового и минимального стока, начиная с 1998 года. При условии сохранения установленных тенденций климатических изменений поступление воды от рек Подолии к главной реке Днестр будет уменьшаться.

**Ключевые слова:** левобережье Верхнего Днестра; изменения климата; изменения характеристик годового, максимального и минимального стока

*Подання до редакції : 01. 06. 2021*

*Надходження остаточної версії : 14. 06. 2021*

*Публікація статті : 30. 06. 2021*

УДК 504.6(477.85)

## ОСОБЛИВОСТІ СВІТЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ЧЕРНІВЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ

А. В. Жук, О. Д. Зароченцева

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

58002, м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 2

Інститут біології, хімії та біоресурсів

e-mail: a.zhuk@chnu.edu.ua; o.zarochentseva@chnu.edu.ua

<https://orcid.org/0000-0002-0405-8037>; <https://orcid.org/0000-0002-2451-5223>

Проблема світлового забруднення навколишнього середовища набуває дедалі більшої актуальності у глобальному масштабі. Якщо раніше дослідники акцентували увагу на яскравість нічного неба над мегаполісами, то останніми роками з'являються численні наукові праці, присвячені дослідженню світлового забруднення природоохоронних територій, сільських ландшафтів та мереж транспортного сполучення. Метою даного дослідження була оцінка світлового забруднення атмосфери у Чернівецькій області та м. Чернівці на основі аналізу аерокосмічних знімків. Матеріалами дослідження слугували інтерактивні ГІС-карти Radiance Light Trends, для кількісного аналізу застосовано сервіс Light trend analysis. Встановлено тенденцію до зростання рівня світлового забруднення по області із річним приростом 2,45 % за період з 1992 по 2014 рр. та 2,93 % за період з 2014 по 2021 рр. Показано, що зростання рівня світлового забруднення в Чернівецькій області відбувається за рахунок районних центрів, трас міжнародного значення, розважально-туристичних комплексів. У обласному ж центрі за останні 8 років спостерігається стабільний рівень сумарного річного світлового забруднення. Знайдено рівняння експоненційного росту світлового забруднення для області та міста. На території Прут-Сіретського межиріччя виділено велику «світлову пляму» неправильної форми, яка перетинає область з північного заходу на південний схід і охоплює обласний центр з передмістям та автомобільний шлях національного значення Н-10. Енергетична яскравість у центрі плями становить  $47,49 \cdot 10^{-9}$  нВт/см<sup>2</sup> ср, по краях – від  $1 \cdot 10^{-9}$  нВт/см<sup>2</sup> ср. Над невеликими населеними пунктами з нерозвиненою промисловістю, де основні джерела світлового забруднення – вуличні ліхтарі, формуються плями з середньою енергетичною яскравістю:  $1-5 \cdot 10^{-9}$  нВт/см<sup>2</sup> ср. Найвищий рівень світлового забруднення Чернівецької області зареєстровано у січні, найнижчий – у березні. Засвітлення вздовж двох найбільш ілюмінованих трас Чернівецької області залишається відносно сталим незалежно від сезону спостережень.

**Ключові слова:** світлове забруднення; яскравість нічного неба; дистанційний моніторинг; Чернівецька область.

### 1. ВСТУП

Явище глобальної індустріалізації супроводжується щоденним збільшенням обсягів електроенергії, яка витрачається на нічне освітлення будівель, вулиць, площ і парків. Це призводить до світлового забруднення великих територій, насамперед міст. Надмірне нічне освітлення зумовлює утворення так званих світлових куполів над урбанізованими територіями. Це явище дедалі більше привертає увагу іноземних і вітчизняних науковців [1–7].

Окрім очевидних наслідків: психологічних розладів, безсоння, депресії у людини [2, 8], порушення циркадних ритмів, дезорієнтації у про-

сторі тварин [9, 10], зсуву у датах фенологічних фаз рослин [11] тощо, світлове забруднення має чималий перелік прихованих впливів. Порушуються життєво важливі біохімічні та фізіологічні процеси у живих організмах [12, 13]. Це, в свою чергу, призводить до репродуктивних проблем, порушення структури популяцій, скорочення екологічних ніш в угрупованнях, зниження біологічного різноманіття [14]. Найбільше страждають від штучного освітлення тварини із нічним способом життя та рослини, які запилюються нічними комахами.

Опосередкованого негативного впливу за-

знають і інші компоненти екологічних систем. Зокрема, надмірне освітлення водою сприяє інтенсивному розвитку фітопланктону. А цвітіння води, як відомо, супроводжується кисневим дефіцитом і евтрофікацією [13]. Науковці акцентують увагу на зниженні якості ряду забезпечувальних, регулюючих та культурних послуг, що надаються екосистемами з підвищеним рівнем нічного освітлення [14].

Проблема світлового забруднення розглядалась науковцями здебільшого на прикладі яскраво освітлених мегаполісів та агломерацій. Проте останніми роками спостерігається підвищений інтерес до автотрас [7], сільських доріг та невеликих поселень [15, 16], заповідних територій [16, 17]. Це свідчить про загострення ситуації та актуальність подібних досліджень. У доступній нам науковій літературі проблема світлового забруднення Чернівецької області не висвітлена. В Україні це питання досліджувалося на прикладах Ужгорода [18], Харкова [19], Кривого Рогу [1].

Метою наших досліджень була оцінка світлового забруднення атмосфери у Чернівецькій області та м. Чернівці на основі аналізу аерокосмічних знімків.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження охоплює адміністративну територію Чернівецької області площею 8,1 тис. км<sup>2</sup>. За особливостями рельєфу вона поділяється на три частини: рівнинну (Прут-Дністровське межиріччя), передгірну (Прут-Сіретське межиріччя) і гірську (Покутсько-Буковинські Карпати). Близько 31,6 % території вкрито лісами. Клімат помірно-континентальний, м'який, вологий; у горах зима більш тривала, сніжна, літо вологе, прохолодне. Складний рельєф області обумовлює нерівномірність її заселення, розташування промислових об'єктів, густоти та розгалуженості автомобільних доріг. Водночас щільність автошляхів із твердим покриттям у Чернівецькій області – одна з найвищих по Україні (355,5 км на 1000 км<sup>2</sup> території) [20]. З півночі на південь область перетинає міжнародна траса М-19 Доманове (на м. Брест) – Ковель – Чернівці – Терембле (на м. Бухарест) протяжністю 477,284 км із об'їздом через м. Чернівці протяжністю 11,3 км. Також на території області проходять національні траси Н-03 Житомир – Чернівці (46,138 км) – з північного сходу на захід і Н-10 Стрий – Івано-Франківськ – Чернівці – Мамалига (на м. Кишинів) (71,227 км) – з північного заходу на схід.

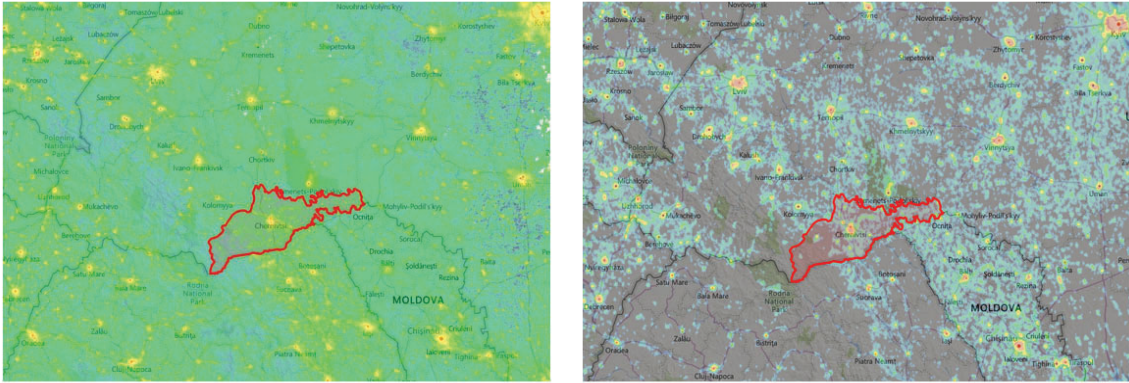
Матеріалами для аналізу динаміки світлового забруднення Чернівецької області слугували інтерактивні ГІС-карти Radiance Light Trends. Веб-сайт Radiance Light Trends – частина проекту GEOEssential, який фінансується Європейським союзом [21]. Карта створена на основі даних супутників-шпигунів, які перебували на орбіті з 1992 по 2013 рік (супутникова система DMSP-OLS). А з 2012 року донині основою для карти слугують дані, зібрані супутником Suomi, який контролюють NASA та Національне управління океанічних і атмосферних досліджень (супутникова система VIIRS DNB). Карта оновлюється автоматично, відповідно до нових супутникових даних. Інтерфейс інтерактивної карти дозволяє маніпулювати масштабом, а також порівняти, як змінювалося світлове забруднення на певній території за останні десятиліття.

Радіометр для видимих інфрачервоних зображень Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band (DNB) збирає глобальні ГІС-дані на основі виявлення джерел штучного (електричного) освітлення на поверхні Землі. Більшість цих джерел локалізуються у населених пунктах. VIIRS збирає вихідні дані, які можуть бути використані для формування щомісячних і щорічних карт глобального випромінювання урбанізованих територій з електричним нічним освітленням. Карти Radiance Light Trends побудовані з урахуванням фільтрів фонові засвітки, прямих і відбитих від місяця сонячних променів, впливу хмар і джерел засвітлення, не пов'язаних з електричним освітленням (наприклад, пожежі, спалахи) [22].

Для опрацювання даних, отриманих з інтерактивних карт, у середовищі Radiance Light Trends окреслили межі дослідного полігону за контурами адміністративної області і зберегли область ROI для подальшого аналізу. Часові тренди світлового забруднення побудовано за допомогою опції Light trend analysis на сайті Radiance Light Trends. Аналіз сезонної динаміки світлового забруднення здійснили на основі серії знімків збереженої області ROI в різні місяці 2018–2019 рр.

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На глобальній інтерактивній карті Radiance Light Trends Чернівецька область не конкурує за ступенем світлового забруднення із містами-мегаполісами. Проте, саме через Прут-Дністровське межиріччя проходить зона підвищеного світіння, що тягнеться вздовж Карпатсь-



**Рис. 1** -- Чернівецька область на фрагментах карт світлового забруднення станом на грудень 2020 р (зліва) і за 1992 р. (справа)  
**Fig. 1** – Chernivtsi Region on the light pollution map fragments as of December, 2020 (on the left), and for 1992 (on the right)

кої гірської системи від Кракова до Бухаресту. Ця зона виділяється не лише на тлі Карпатських гір, але й порівняно із центральною частиною України (рис.1).

Для порівняння ми співставили карту, отриману зі супутника у грудні 2020 року із картою за 1992 рік (рис. 1). На цьому зображенні зона світіння вздовж Карпат виражена менш яскраво, особливо порівняно із Центральною Україною. Отже, антропогенний вплив на стан нічного неба за останні 27 років дещо змінився. Для кількісної оцінки цих змін ми скористалися сервісом Light trend analysis. На основі серії космознімків було розраховано експоненційні рівняння динаміки рівня світлового забруднення Чернівецької області в два часових періоди: 1992–2013 рр. (рис. 2) та 2014–2021 рр.(рис. 3).

Як видно з рисунку 2, за 22 роки сумарна річна інтенсивність світлового випромінювання в Чернівецькій області зросла майже вдвічі. Екс-

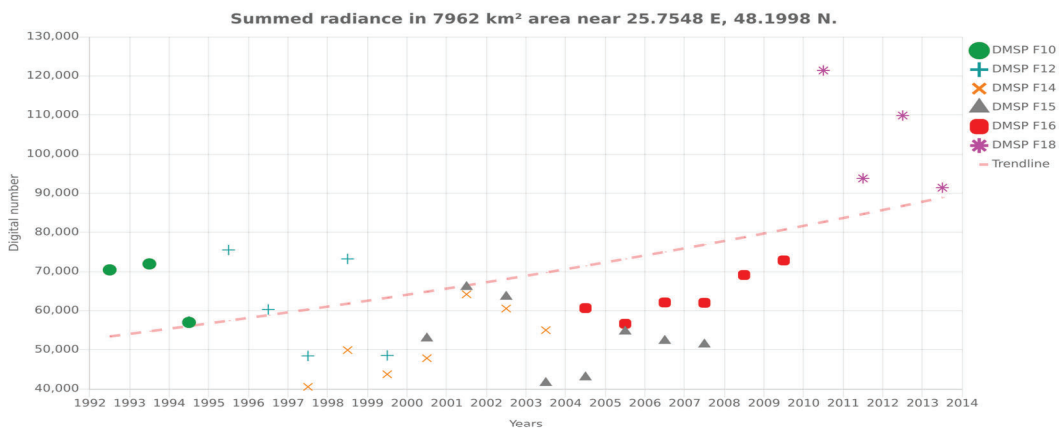
поненційний ріст світлового забруднення за досліджений термін можна зобразити рівнянням (1). Середній приріст за рік складає 2,45 %.

$$Y = 5,66 \cdot 10^3 \cdot e^{6,64 \cdot 10^{-5} \cdot x}; R^2 = 0,32. \quad (1)$$

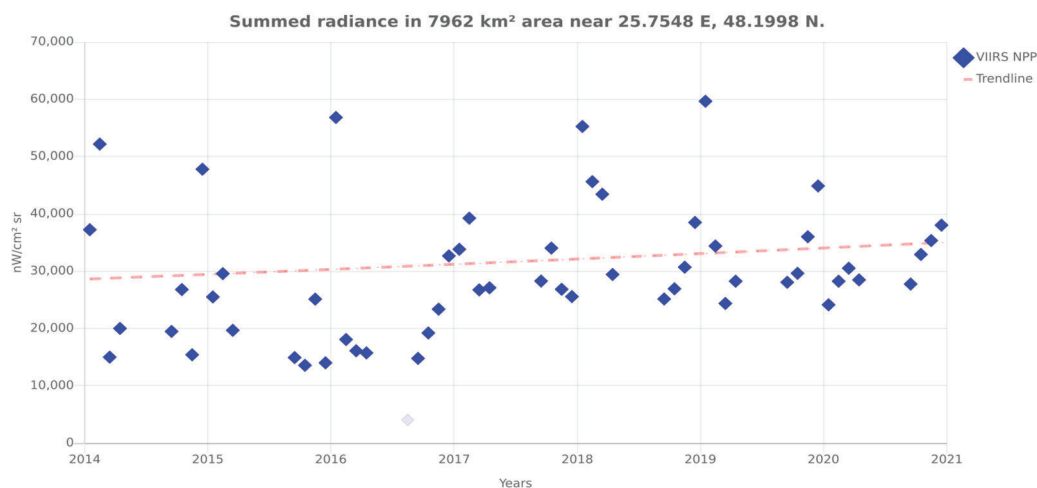
За означений період використане для спостережень обладнання не мало на меті кількісного визначення світлового забруднення, не було відкаліброване відповідним чином, тому результати відображаються в умовних одиницях.

На рисунку 3 представлена динаміка сумарного світлового забруднення за останні сім років. Середній приріст показника за рік становить 2,93 %. Графік демонструє щорічне суттєве відхилення від трендової лінії у зимові місяці, коли зростає середньодобова тривалість використання штучного освітлення. Експоненційний ріст світлового забруднення за семирічний період описується рівнянням (2):

$$Y = 1,05 \cdot 10^3 \cdot e^{7,93 \cdot 10^{-5} \cdot x}; R^2 = 0,03. \quad (2)$$



**Рис. 2** -- Динаміка сумарного річного світлового забруднення Чернівецької області за період з 1992 до 2013 рр., умов.од.  
**Fig. 2** – Dynamics of summed annual light pollution over Chernivtsi Region for the period from 1992 to 2013, digital number



**Рис. 3** -- Динаміка сумарного річного світлового забруднення Чернівецької області за період з 2014 до 2021 рр., нВт/см<sup>2</sup> ср  
**Fig. 3** – Dynamics of summed annual light pollution over Chernivtsi region for the period from 2014 to 2021, mW/cm<sup>2</sup> sr

Хоча трендова лінія показує тенденцію до зростання рівня світлового забруднення (рис.4), порівняння показника в абсолютних величинах свідчить про незначні зміни, які можуть бути описані експоненційним рівнянням (3). Середній річний приріст показника складає 1,84 %.

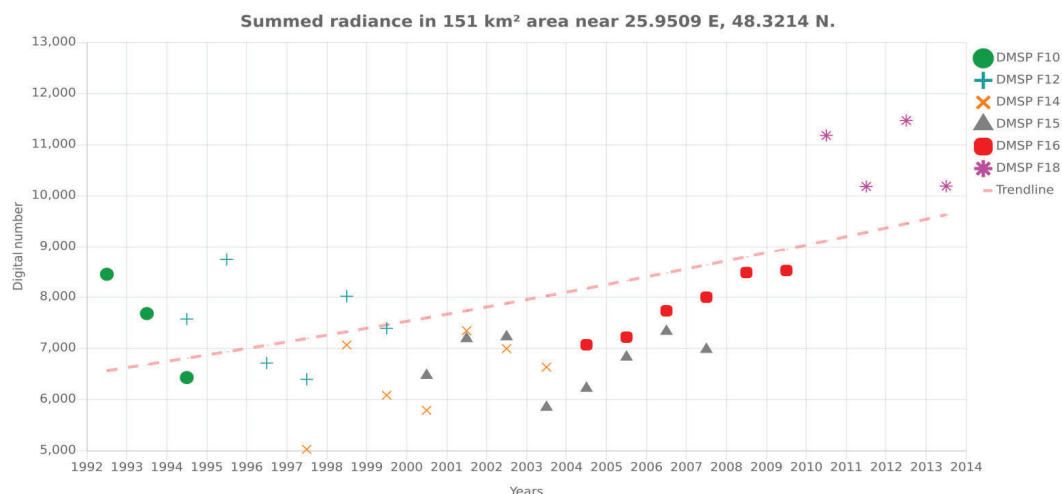
$$Y = 1,21 \cdot 10^3 \cdot e^{5 \cdot 10^{-5} \cdot x}; R^2 = 0,39. \quad (3)$$

За період з 2014 по 2021 рр. спостерігається тенденція до незначного зменшення сумарного річного світлового забруднення міста (рис.5). Експоненційне рівняння на цей період має на-

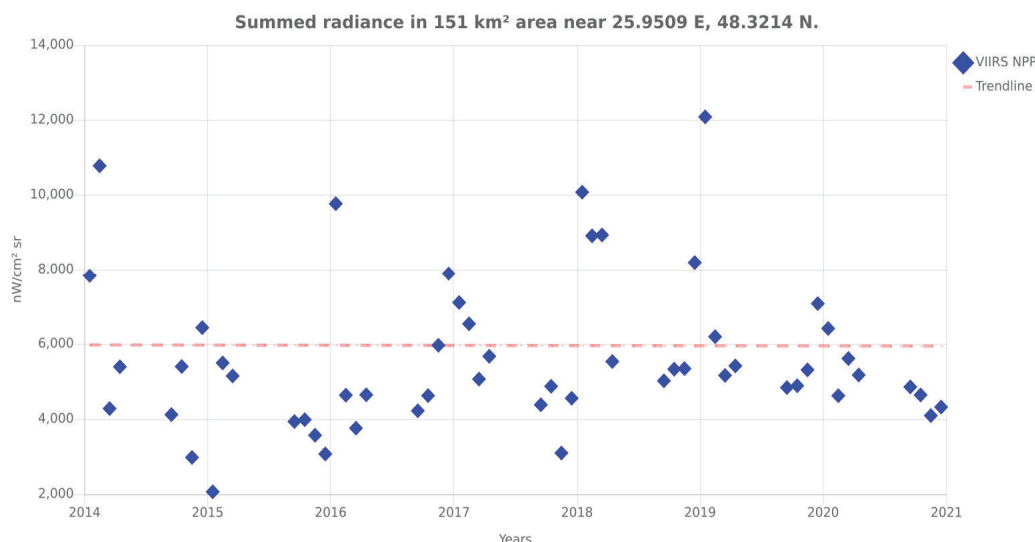
ступний вигляд (4). Середній річний приріст показника від'ємний і становить -0,08 %.

$$Y = 6,52 \cdot 10^3 \cdot e^{-2,10 \cdot 10^{-6} \cdot x}; R^2 = -0,03. \quad (4)$$

Частково це пов'язано із модернізацією вуличного освітлення обласного центру. Близько 4 тис. ламп замінено на LED-світильники із автоматичним режимом вмикання/вимикання і працюють вночі з меншою потужністю, ніж увечері. Разом з тим вулиці віддалених районів міста ілюміновані незадовільно.



**Рис. 4** -- Динаміка сумарного річного світлового забруднення м. Чернівці за період з 1992 до 2013 рр., умов. од.  
**Fig.4** – Dynamics of summed annual light pollution over Chernivtsi city for the period from 1992 to 2013, digital number



**Рис. 5** -- Динаміка сумарного річного світлового забруднення м. Чернівці за період з 2014 до 2021 рр., нВт/см<sup>2</sup> ср  
**Fig. 5** – Dynamics of summed annual light pollution over Chernivtsi city for the period from 2014 to 2021, mW/cm<sup>2</sup> sr

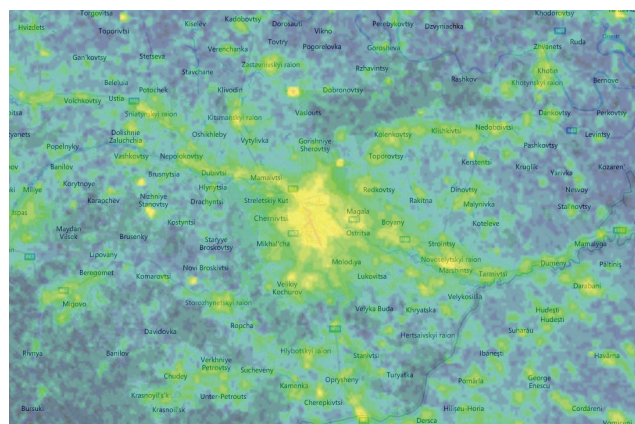
У глобальному масштабі відмічається тенденція до збільшення світлового забруднення у мегаполісах, великих містах, агломераціях [1, 19, 23–25]. На прикладі Чернівецької області спостерігаємо зворотнє явище: сумарна інтенсивність світлового випромінювання тут зростає переважно за рахунок районних центрів, трас міжнародного значення, розважально-туристичних комплексів. Причиною цього може бути незадовільна робота комунальних служб з вуличного освітлення, занепад промисловості міста і модернізація вуличного освітлення на окремих вулицях.

Однак, варто зауважити, що передмістя м. Чернівці та автошляхи міжміського та міжнародного сполучення, що проходять через місто, включаючи об'їзну дорогу формують велику «світлову пляму» неправильної форми, яка перетинає область з північного заходу на південний схід. Вона охоплює м. Чернівці з передмістям та автомобільний шлях національного значення Н-10 (Стрий – Івано-Франківськ – Чернівці – пропускний пункт Мамалига) (рис. 6). В центрі плями енергетична яскравість становить  $47,49 \cdot 10^{-9}$  нВт/см<sup>2</sup> ср, по краях – від  $1 \cdot 10^{-9}$  нВт/см<sup>2</sup> ср.

Загальна площа цієї світлової плями становить 741 км<sup>2</sup> (площа м. Чернівці – 153 км<sup>2</sup>). Для порівняння наведемо співвідношення світлових плям навколо окремих міст України і ближнього зарубіжжя (табл. 1).

Отже, за рейтингом розмірів світлової плями серед дев'яти обраних нами міст м. Чернівці посідає 4 місце, за розмірами самого міста –

сьоме, за співвідношенням площі світлової плями навколо міст до площі самого міста – п'яте. Серед усіх проаналізованих міст України найменшу площу займає м. Ужгород, тоді як це місто є лідером у рейтингу співвідношення розмірів світлової плями до розмірів самого міста.



**Рис. 6** -- «Світлова пляма» з центром у м. Чернівці  
**Fig. 6** – “Light spot” with the center in Chernivtsi city

Проблему світлового забруднення та динаміку засвітлення нічного неба в м. Ужгород за період між 1983 та 2005 роками досліджували В. П. Єпішев зі співавторами [18]. Науковці показали, що новітня забудова міста в його північній частині призвела до суттєвого підвищення рівня світлового забруднення, тоді як в старій частині міста та в приміській зоні суттєвих змін не спостерігалось. Отже, історія формування світлових плям навколо кожного міста унікальна і залежить від багатьох факторів.

**Таблиця 1** – Площі міст та світлових плям навколо них  
**Table 1** – Area of cities and light spots around them

№ п/п	Місто	Площа світлової плями, км <sup>2</sup>	Площа міста, км <sup>2</sup>	Співвідношення площі світлової плями до площі міста
1	Хмельницький, Україна	298	90	3,3
2	Івано-Франківськ, Україна	395	83,73	4,7
3	Ужгород, Україна	622	40	15,6
<b>4</b>	<b>Чернівці, Україна</b>	<b>741</b>	<b>153</b>	<b>4,8</b>
5	Вінниця, Україна	766	113,2	6,8
6	Кошице, Словаччина	765	242,8	3,2
7	Ясси, Румунія	1169	93,9	12,4
8	Дебрецен, Угорщина	1391	461,2	3,0
9	Люблін, Польща	1990	147,5	13,5

Наступна за величиною пляма в Чернівецькій області з середньою енергетичною яскравістю  $2,87 \cdot 10^9$  нВт/см<sup>2</sup> ср простягається вздовж авто-траси Н-03 (Житомир-Чернівці). Плями з середньою енергетичною яскравістю  $1,5 \cdot 10^9$  нВт/см<sup>2</sup> ср виявлені над невеликими населеними пунктами з нерозвиненою промисловістю, де основні джерела світлового забруднення – вуличні ліхтарі. Особливої уваги потребує пляма над с. Мигове, що також охоплює частину авто-траси Р-62, що проходить територією Івано-Франківської та Чернівецької областей через Криворівню – Вижницю – Сторожинець – Чернівці на відрізок від Лукавців до Заріччя через Берегомет.

Проаналізовано сезонну динаміку світлового забруднення Чернівецької області. Відомо, що ступінь світлового забруднення залежить від сезону спостереження [22, 26]. З одного боку на це впливають природні чинники: наявність снігового покриву, здатність листя дерев відбивати місячне світло, тривалість світлового дня тощо. З іншого боку – багато видів антропогенної діяльності мають сезонну діяльність, наприклад, парки атракціонів, горнолижні траси, частота проведення концертів під відкритим небом із застосуванням лазерного шоу, підсвітка фонтанів тощо. Зважаючи на це, ми проаналізували серію з восьми зображень дослідної території з середньомісячними даними за вересень 2018 – квітень 2019 рр. (рис. 7, а-з). За літні місяці інформації на сайті Radiance Light Trends немає у зв'язку з тривалістю світлового дня. Супутник Suomi пролітає над дослідною територією до заходу сонця, а отже отримані за період між кві-

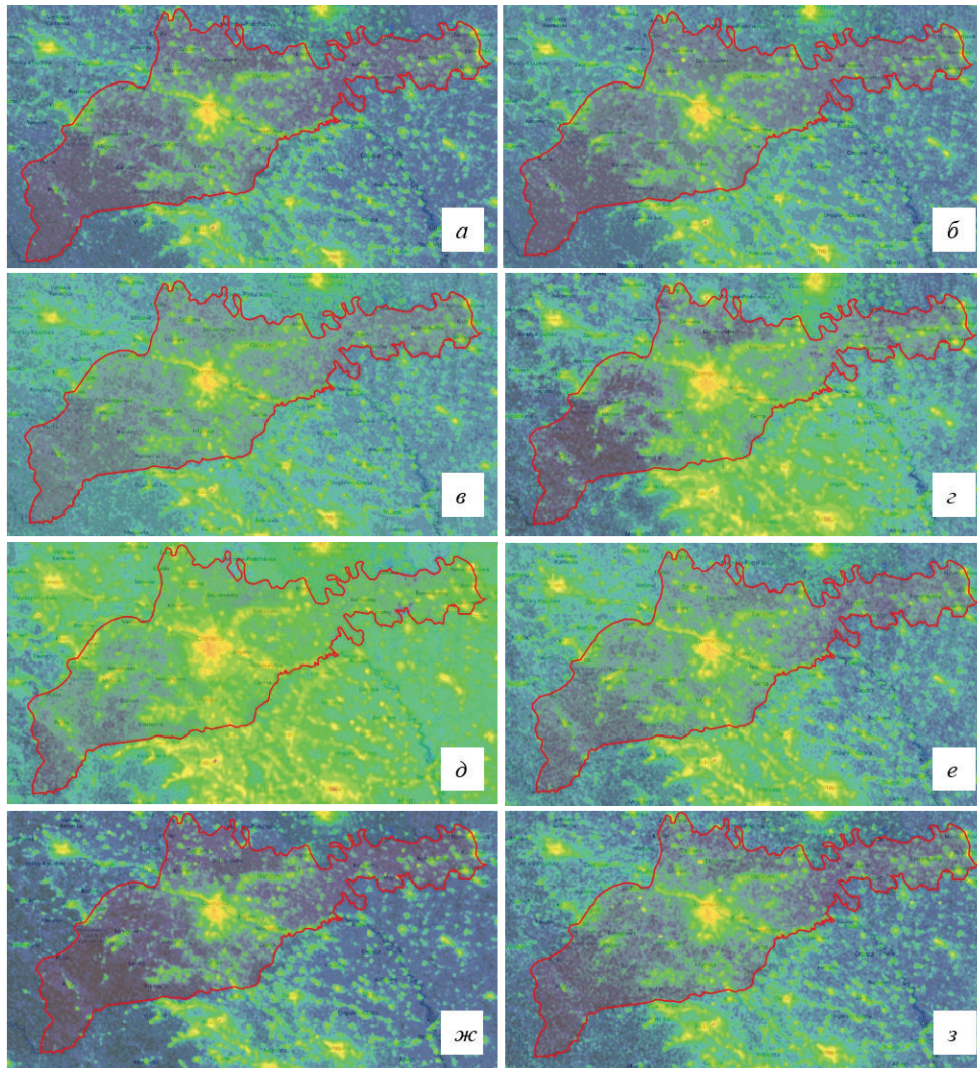
тнем і вереснем космознімки не включені до баз даних як неінформативні.

Найвищий рівень світлового забруднення Чернівецької області спостерігається у січні (рис. 7, д). Фактично суцільна світлова пляма з осередками різної інтенсивності охоплює всю територію Прут-Дністровського та Прут-Сіретського межиріччя. Зона Карпатських гір характеризується меншим світловим забрудненням відносно решти території області, але більшим порівняно з іншими порами року. Найнижчий рівень світлового забруднення спостерігається у березні (рис. 7, ж). В цей час найзручніше вивчати та описувати характерні для області світлові плями.

Вартими уваги є рисунки 7, г та 7, е які ілюструють світлове забруднення дослідної та прилеглих територій у грудні та лютому відповідно. Порівняно з ранньо-осінніми та весняними місяцями спостерігаємо вищий рівень світлового забруднення, проте нижчий порівняно з територією сусідньої Румунії, яка чітко диференціюється на карті як пляма суцільного засвітлення нічного неба. Також можна оцінити підвищений ступінь світлового забруднення трьох прикордонних районів: Глибоцького, Герцаївського та Новоселицького. Можливо інтенсивні світлові плями на їх території у цей період пов'язані не тільки із засвітленням нічного неба із власних джерел, але й з боку сусідньої держави.

Цікавим є той факт, що засвітлення вздовж двох найбільш ілюмінованих трас Чернівецької області залишається приблизно однаковим незалежно від сезону спостережень.





**Рис. 7.** Ступінь світлового забруднення Чернівецької області: а) вересень 2018 р.; б) жовтень 2018 р.; в) листопад 2018 р.; г) грудень 2018 р.; д) січень 2019 р.; е) лютий 2019 р.; жс) березень 2019 р.; з) квітень 2019 р.

**Fig. 7** – Level of light pollution in Chernivtsi region: а) September 2018; б) October 2018; в) November 2018; г) December 2018; д) January 2019; е) February 2019; жс) March 2019; з) April 2019

## ВИСНОВКИ

В закордонних літературних джерелах проблема світлового забруднення обговорюється активно, в розрізі різних наукових дисциплін, у тому числі й екології. Багато праць стосується впливу штучного нічного освітлення на стан і функціонування окремих організмів, популяцій та цілих екосистем. У доступній нам вітчизняній науковій літературі проблема розглядається переважно в астрономічному та рідше – гігієнічному аспектах, тоді як екологічні питання висвітлені меншою мірою.

На відміну від світової тенденції, зростання рівня світлового забруднення в Чернівецькій області відбувається за рахунок районних центрів, трас міжнародного значення,

розважально-туристичних комплексів.

Найвищий рівень світлового забруднення Чернівецької області спостерігається у січні. Фактично суцільна світлова пляма з осередками різної інтенсивності охоплює всю територію Прут-Дністровського та Прут-Сіретського межиріччя. Найнижчий рівень світлового забруднення відмічено у березні.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мальченко С., Слюсаренко М. Дослідження світлового забруднення нічного неба. *Теоретична фізика і астрономія*. 2014. № 15. С. 81–86.
2. Назаренко Л. А., Чернець В. С. Проблеми світлового забруднення. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2014. № 2. С. 6–17.
3. Katz Y., Levin N. Quantifying urban light pollution –

- A comparison between field measurements and EROS-B imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2016. 177. Pp. 65-77.
4. Xiang W., Tan M. Changes in light pollution and the causing factors in China's protected areas, 1992–2012. *Remote Sensing*. 2017. 9(10). 1026. <https://doi.org/10.3390/rs9101026>
  5. Семків Ю. М., Касеркевич В. С. Математичні моделі світлового забруднення атмосфери. Тернопіль, 2019. 62 с.
  6. Light pollution in USA and Europe: The good, the bad and the ugly / Falchi F. et al. *Journal of environmental management*. 2019. 248: 109227. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.128>.
  7. Jechow A., Hölker F. Evidence that reduced air and road traffic decreased artificial night-time skyglow during COVID-19 lockdown in Berlin, Germany. *Remote Sensing*. 2020. 12 (20): 3412. <https://doi.org/10.3390/rs12203412>
  8. Global rise of potential health hazards caused by blue light-induced circadian disruption in modern aging societies / Hatori M. et al. *Aging and Mechanisms of Disease*. 2017. 3: 9. <https://doi.org/10.1038/s41514-017-0010-2>
  9. Longcore T., Rich C. Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2004. 2(4). Pp. 191-198.
  10. Cabrera-Cruz S. A., Smolinsky J. A., Buler J. J. Light pollution is greatest within migration passage areas for nocturnally-migrating birds around the world. *Scientific reports*. 2018. 8: 3261. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21577-6>.
  11. Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment / Škvareninová J. et al. *Moravian Geographical Reports*. 2017. 25(4). Pp. 282-290. <https://doi.org/10.1515/mgr-2017-0024>.
  12. Анисимов В. Н., Виноградова И. А. Световой режим, мелатонин и риск развития рака. *Вопросы онкологии*. 2006. Т. 52, № 5. С. 491–498.
  13. Бармасов А. В., Бармасова А. М., Яковлева Т. Ю. Биосфера и физические факторы. Световое загрязнение окружающей среды. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2014. № 33. С. 84–101.
  14. Light pollution as a biodiversity threat / Hölker F., Wolter C., Perkin E. K., Tockner K. *Trends in ecology & evolution*. 2010. 25(12). Pp. 681-682. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>
  15. Jechow A., Kyba C. C., Hölker F. Mapping the brightness and color of urban to rural skyglow with all-sky photometry. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2020. 250: 106988. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.106988>
  16. Peña-García A., Sędziwy A. Optimizing lighting of rural roads and protected areas with white light: a compromise among light pollution, energy savings, and visibility. *Leukos*. 2020. 16(2). Pp. 147-156. <https://doi.org/10.1080/15502724.2019.1574138>
  17. Is Artificial light at night dangerous for the Balkan strict protected areas at present? / Peregrin M. et al. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2020. 231. P. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4452-y>
  18. Спішев В. П., Ісак І. І., Клімик В. У. Світлове “забруднення” нічного неба в пункті Ужгород. *Науковий вісник Ужгородського університету. Сер.: Фізика*. 2005. Вип. 18. С. 16–18.
  19. Галетич І. К., Вергелес Ю. І. Комплексний вплив забруднень електромагнітного походження на стан довкілля великого міста (на прикладі світлового забруднення). *Комунальне господарство міст*. 2011. № 101. С. 139–149.
  20. Транспорт і зв'язок Чернівецької області, 2018. Статистичний збірник / за ред. Г. І. Петрової. Чернівці, 2019. 99 с.
  21. Stare J., Kyba C. Radiance Light Trends. Potsdam: GFZ Data Services, 2019. <https://doi.org/10.5880/GFZ.1.4.2019.001>
  22. Variation of individual location radiance in VIIRS DNB monthly composite images / Coesfeld J., Anderson S. J., Baugh K., et al. *Remote Sensing*. 2018. 10(12): 1964. <https://doi.org/10.3390/rs10121964>
  23. Bará S. Characterizing the zenithal night sky brightness in large territories: how many samples per square kilometre are needed? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. 473(3). Pp. 4164-4173. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2571>
  24. Artificial light pollution at night: a risk for normal circadian rhythm and physiological functions in humans / Kumar P., Ashawat M. S., Pandit V. et al. *Current Environmental Engineering*. 2019. 6(2). Pp. 111-125.
  25. Kyba C. C. Is light pollution getting better or worse? *Nature Astronomy*. 2018. 2. Pp. 267-269. <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0402-7>
  26. Levin N., Zhang Q. A global analysis of factors controlling VIIRS nighttime light levels from densely populated areas. *Remote Sensing of Environment*. 2017. 190. Pp. 366-382. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.006>

## REFERENCE

1. Malchenko, S. & Slyusarenko, M. (2014). Doslidzhennia svitlovoho zabrudnennia nichnoho neba. [Study of light pollution of the night sky]. *Teoretychna fizyka i astronomiia [Theoretical physics and astronomy]*, 15, pp. 81–86. (in Ukr.)
2. Nazarenko, L. A. & Chernets, V. S. (2014). Problemy svitlovoho zabrudnennia. [Problems of light pollution]. *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka [Lighting and electricity]*, 2, pp. 6–17. (in Ukr.)
3. Katz, Y. & Levin, N. (2016). Quantifying urban light pollution – A comparison between field measurements and EROS-B imagery. *Remote Sensing of Environment*, 177, 65-77.
4. Xiang, W. & Tan, M. (2017). Changes in light pollution and the causing factors in china's protected areas, 1992–2012. *Remote Sensing*, 9(10), 1026. <https://doi.org/10.3390/rs9101026>
5. Semkiv, Yu.V. & Kaserevych, V.S. (2019). *Matematychni modeli svitlovoho zabrudnennia atmosfery [Mathematical models of light pollution of the atmosphere]*. Ternopil. (in Ukr.)
6. Falchi, F. et al. (2019). Light pollution in USA and Europe: The good, the bad and the ugly. *Journal of environmental management*, 248, 109227. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.128>
7. Jechow, A., & Hölker, F. (2020). Evidence that reduced air and road traffic decreased artificial night-time skyglow during COVID-19 lockdown in Berlin, Germany. *Remote Sensing*, 12(20), 3412. <https://doi.org/10.3390/rs12203412>
8. Hatori, M. et al. (2017). Global rise of potential health hazards caused by blue light-induced circadian disruption in modern aging societies. *Aging and Mechanisms of Disease*, 3(1), pp. 1-3. <https://doi.org/10.1038/s41514-017-0010-2>
9. Longcore, T., & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4),

- pp. 191-198.
10. Cabrera-Cruz, S.A., Smolinsky, J.A., & Buler, J.J. (2018). Light pollution is greatest within migration passage areas for nocturnally-migrating birds around the world. *Scientific reports*, 8(1), pp. 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21577-6>.
  11. Škvareninová, J. et al. (2017). Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. *Moravian geographical reports*, 25(4), pp. 282-290. <https://doi.org/10.1515/mgr-2017-0024>
  12. Anisimov, V.N. & Vinogradova, I.A. (2006). Cvetovoy rezhym, melatonin i risk razvitiya raka [Light regime, melatonin and cancer risk]. *Voprosy onkologii [Oncology issues]*, 52(5), pp. 491-498. (in Russ.)
  13. Barmasov, A.V., Barmasova, A.M. & Yakovleva, T.Yu. (2014). Biosfera i fizicheskie factory. Svetovoe zagryaznenie okruzhayushchey sredy. [Biosphere and physical factors. Light pollution of the environment]. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. [Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University]*, 33, pp. 84-101. (in Russ.)
  14. Hölker, F. et al. (2010). Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in ecology & evolution*, 25(12), pp. 681-682. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>
  15. Jechow, A., Kyba, C. C., & Hölker, F. (2020). Mapping the brightness and color of urban to rural skyglow with all-sky photometry. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 250, 106988. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.106988>
  16. Peña-García, A., & Sędziwy, A. (2020). Optimizing lighting of rural roads and protected areas with white light: A compromise among light pollution, energy savings, and visibility. *Leukos*, 16(2), pp.147-156. <https://doi.org/10.1080/15502724.2019.1574138>
  17. Peregrym, M. et al. (2020). Is artificial light at night dangerous for the Balkan strict protected areas at present?. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(2), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4452-y>
  18. Epishev, V.P., Isak, I.I. & Klimyk, V.V. (2005). Svitlove "zabrudnennia" nichnoho neba v punkti Uzhhorod [Light "pollution" of the night sky in Uzhgorod]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Ser.: Fizyka. [Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Ser.: Physics]*, 18, pp. 16-18. (in Ukr.)
  19. Galetych, I.K. & Vergeles, Y.I. (2011). Kompleksnyi vplyv zabrudnen elektromahnitnoho pokhodzhennia na stan dovkillia velykoho mista (na prykladi svitlovoho zabrudnennia). [Complex influence of pollution of electromagnetic on the state of the environment of a big city (on the example of light pollution)]. *Komunalne hospodarstvo mist [Municipal utilities]*, 101, pp. 139-149. (in Ukr.)
  20. Petrova, G.I. (ed.). (2019). *Transport i zviazok Chernivetskoj oblasti, 2018. Statystychnyi zbirnyk [Transport and Communication of Chernivtsi region, 2018. Statistical Yearbook]*. Chernivtsi (in Ukr.)
  21. Stare, J., & Kyba, C. (2019). *Radiance Light Trends*. Potsdam: GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/GFZ.1.4.2019.001>
  22. Coesfeld, J. et al. (2018). Variation of individual location radiance in VIIRS DNB monthly composite images. *Remote Sensing*, 10(12), 1964. <https://doi.org/10.3390/rs10121964>
  23. Bará, S. (2018). Characterizing the zenithal night sky brightness in large territories: how many samples per square kilometre are needed?. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(3), pp. 4164-4173. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2571>
  24. Kumar, P. et al. (2019). Artificial Light Pollution at Night: A risk for normal circadian rhythm and physiological functions in humans. *Current Environmental Engineering*, 6(2), pp. 111-125.
  25. Kyba, C.C. (2018). Is light pollution getting better or worse? *Nature Astronomy*, 2(4), pp. 267-269. <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0402-7>
  26. Levin, N., & Zhang, Q. (2017). A global analysis of factors controlling VIIRS nighttime light levels from densely populated areas. *Remote sensing of environment*, 190, pp. 366-382. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.006>

## PECULIARITIES OF THE ENVIRONMENTAL LIGHT POLLUTION IN CHERNIVTSI REGION

**A. V. Zhuk, O. D. Zarochentseva**

*Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University,*

*Kotsiyubynski Street 2, 58012*

*Institute of biology, chemistry and bioresources*

e-mail: [a.zhuk@chnu.edu.ua](mailto:a.zhuk@chnu.edu.ua); [o.zarochentseva@chnu.edu.ua](mailto:o.zarochentseva@chnu.edu.ua)

<https://orcid.org/0000-0002-0405-8037>; <https://orcid.org/0000-0002-2451-5223>

*Introduction.* Every year industrial development and economic growth make light pollution worsen on a global scale. It is a well-known fact that artificial outdoor lighting causes destruction of wildlife habitat, impacts circadian rhythms of all living beings, disrupts animal behavior and leads to medical disorders of humans. Over the last decade scientists switched their focus from artificial sky glow over large cities to light pollution of rural landscapes, protected areas and roadways.

The *purpose* of this paper consists in assessing night-time light emissions over Chernivtsi Region as well as over city of Chernivtsi using satellite measurements.

*Methods.* Measurements of night-time light emissions were obtained with the help of GIS web application Radiance Light Trends and the light trends analysis tool. The application allows examination of changes in light pollution across selected areas since 1992 and performs time-series analysis with fitting an exponential curve into the data set.

*Results.* The trend in light emissions observed by satellites for Chernivtsi Region indicated brightening at the rate of 2.45 % per year from 1992 to 2014, and 2.93 % per year from 2014 to 2021. The marked increase in the intensity of atmospheric light pollution over Chernivtsi Region is largely attributable to urban expansion of district centers, national & international routes and resort complexes. At the same time, the spatial pattern of the light environment over city of Chernivtsi indicated a nearly constant level of aggregate annual light radiance for the last 8 years. A large irregularly shaped "light spot" was detected on the territory of the Prut-Siret interfluvium. It crosses the region from the northwest to the southeast and covers the regional center with its suburbs and the national highway H-10. The night light radiance constitutes  $47.49 \cdot 10^{-9}$  mW/cm<sup>2</sup> sr in the center of the spot and more than  $1 \cdot 10^{-9}$  mW/cm<sup>2</sup> sr at its edges. The highest level of light pollution in Chernivtsi Region was registered in January, and the lowest – in March. Night-time light emission over two most illuminated highways remains relatively constant regardless of the season.

*Conclusion.* The study highlights that despite low population and low economic activity, rural landscapes demonstrate a trend towards increasing brightness of the night sky. The findings provide a quantitative reference for light pollution management in the region and for further research in the area.

**Key words:** light pollution; night sky brightness; remote sensing; Chernivtsi Region

## ОСОБЕННОСТИ СВЕТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ЧЕРНОВИЦКОЙ ОБЛАСТИ

А. В. Жук, О. Д. Зароченцева

Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича  
58012, г. Черновцы, ул. Коцюбинского, 2

Институт биологии, химии и биоресурсов

e-mail: a.zhuk@chnu.edu.ua; o.zarochentseva@chnu.edu.ua

<https://orcid.org/0000-0002-0405-8037>; <https://orcid.org/0000-0002-2451-5223>

Проблема светового загрязнения окружающей среды приобретает все большую актуальность в глобальном масштабе. Если раньше исследователи акцентировали внимание на яркости ночного неба над мегаполисами, то в последние годы появляются многочисленные научные труды, посвященные исследованию светового загрязнения природоохранных территорий, сельских ландшафтов и транспортных сетей. Целью данного исследования была оценка светового загрязнения атмосферы в Черновицкой области и г. Черновцы на основе анализа аэрокосмических снимков. Материалами исследования послужили интерактивные ГИС-карты Radiance Light Trends, для количественного анализа применен сервис Light trend analysis. Установлена тенденция к росту уровня светового загрязнения по области с годовым приростом 2,45 % за период с 1992 по 2014 гг. и 2,93 % за период с 2014 по 2021 гг. Показано, что рост уровня светового загрязнения в Черновицкой области происходит за счет районных центров, трасс международного значения, развлекательно-туристических комплексов. В областном центре за последние 8 лет наблюдается стабильный уровень суммарного годового светового загрязнения. Получены уравнения экспоненциального роста светового загрязнения для области и г. Черновцы. На территории Прут-Сиретского междуречья выделено большое «световое пятно» неправильной формы, которое пересекает область с северо-запада на юго-восток и охватывает областной центр с пригородами и автомобильный путь национального значения Н-10. Энергетическая яркость в центре пятна составляет  $47,49 \cdot 10^{-9}$  нВт/см<sup>2</sup> ср, по краям – от  $1 \cdot 10^{-9}$  нВт/см<sup>2</sup> ср. Самый высокий уровень светового загрязнения Черновицкой области зарегистрирован в январе, самый низкий – в марте. Засветка ночного неба вдоль двух наиболее иллиминированных трасс Черновицкой области остается примерно одинаковым независимо от сезона наблюдений.

**Ключевые слова:** световое загрязнение; яркость ночного неба; дистанционный мониторинг; Черновицкая область.

Подання до редакції : 14. 05. 2021

Надходження остаточної версії : 21. 05. 2021

Публікація статті : 30. 06. 2021

УДК 594.1, 628.353, 631.67

## ОЦІНКА СЕДИМЕНТАЦІЙНОЇ РОЛІ ПОПУЛЯЦІЇ МОЛЮСКІВ РОДУ *DREISSENA* У КОНТРОЛІ ЯКОСТІ ВОДИ КАХОВСЬКОГО МАГІСТРАЛЬНОГО КАНАЛУ (ХЕРСОНСЬКА ОБЛАСТЬ)

Д. В. Лукашов, Л. К. Хохлова

Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
вул. Володимирська, 60, 01033, Київ, Україна, [ecologyknu@gmail.com](mailto:ecologyknu@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-1375-0447>

Україна має унікальний природно-ресурсний потенціал і за якісним складом ґрунтів та біопродуктивністю угідь є однією з найбагатших аграрних держав світу. Понад 2/5 сільськогосподарських угідь припадає на степову зону – зону нестійкого і недостатнього зволоження. У посушливих умовах виробництво сільськогосподарської продукції значною мірою залежить від вирішення проблеми штучного зрошення сільгоспугідь. У зв'язку з цим, починаючи з 60-х років ХХ ст. на півдні України було розпочато великомасштабне спорудження меліоративних об'єктів, зокрема побудовано Каховське водосховище і найбільшу в Європі Каховську зрошувальну систему. Якість води, призначеної для зрошування, залежить від джерела надходження та внутрішніх фізико-хімічних та біологічних процесів у меліоративній системі. Важливим біотичним компонентом гідромеліоративних систем є прикріплені двостулкові молюски, що утворюють щільні поселення на твердих штучних субстратах і зазвичай розглядаються як джерело біологічних перешкод, з якими проводять постійну боротьбу. Проте їх фільтраційна та седиментаційна роль може впливати на процеси самоочищення води. Метою роботи була оцінка ролі обростань молюсків-фільтраторів у очищенні зрошувальних вод від зависів та виведенні з товщі води деяких важких металів. Робота ґрунтується на матеріалах польових досліджень процесів осідання зависів з водної товщі за допомогою седиментаційних пасток на 5 станціях вздовж Каховського магістрального каналу. Встановлено, що загальна біомаса поселень прикріплених двостулкових молюсків *Dreissena polymorpha* (Pall., 1771) та *Dreissena bugensis* (Andr., 1897) в каналі становить 370 – 463 т, які протягом літніх місяців осаджують до донних відкладів 11,6 – 27,5 т зависів, що проявляється у зменшенні концентрації зависів у воді вздовж течії каналу. Разом із зависами до донних відкладів щомісяця осаджується 1,8 – 3,9 кг Сг, 0,3 – 0,6 кг Ні, 0,09 – 0,24 кг Со, 0,08 – 0,18 кг Рб, 0,088 – 0,144 кг Сд. Таким чином поселення прикріплених молюсків на гідротехнічних спорудах можуть розглядатися як біологічні меліоратори, функціонування яких сприяє покращенню якості зрошувальних вод.

**Ключові слова:** меліоративні зрошувальні системи; двостулкові молюски; седиментація; важкі метали.

### 1. ВСТУП

Найбільша частина сільськогосподарських угідь України припадає на зону нестійкого і недостатнього зволоження – 48% орних земель розташовано в Південному регіоні держави, де спостерігаються періодичні засухи. У посушливих умовах виробництво сільськогосподарської продукції значною мірою залежить від вирішення проблеми штучного зрошення сільгоспугідь. У зв'язку з цим, починаючи з 60-х років ХХ ст. на півдні України було розпочато великомасштабне спорудження меліоративних об'єктів, побудовано Каховське водосховище на р. Дніпро і найбільшу в Європі – Каховську зрошувальну систему, сумарна протяжність каналів якої становить 520 км. Найбільшим водогосподарським об'єктом системи є Каховський магістральний

канал (далі КМК) протяжністю 132 км, який забезпечує розподіл води для зрошування сільськогосподарських угідь та водопостачання сільських населених пунктів Херсонської і Запорізької областей.

Територія, через яку прокладено магістральний та розподільчі канали, характеризується складними кліматичними умовами, значні бездошові періоди сприяють виникненню атмосферних засух і суховіїв. Клімат помірно-континентальний із порівняно м'якою зимою (середні температури зимових місяців  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) та спекотним і довгим літом (середні температури  $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , максимальні – понад  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Середня багаторічна кількість опадів складає близько 300–400 мм. Переважна кількість опадів випадає влітку у вигляді злив, взим-

ку сніговий покрив нестійкий, існує кілька десятків днів. Таким чином, основним джерелом живлення зрошувальної системи виступає Каховське водосховище, з якого за допомогою Головної насосної станції (ГНС) здійснюється забір води в обсягах до 530 м<sup>3</sup>/с на висоту 25 м.

Зарегулювання р. Дніпро та інтенсивне водоспоживання у сільському господарстві змінило його гідрологічний режим, що проявилось у зменшенні швидкості течії та інтенсивності турбулентного перемішування, зменшенні водообміну. Тип кругообігу речовин і енергії у Каховському водосховищі перетворився з транзитного на замкнутий, домінуючої ролі набули внутрішньо водоймові процеси. Трансформація гідрологічного режиму неминуче призвела до зміни хімічного складу дніпровської води. Акваторія пониззя Дніпра стала частковим акумулятором твердого стоку та хімічних речовин, які змиваються зі всього басейну [1]

Якість зрошувальних вод залежить від процесів, що відбуваються у Каховському водосховищі. Незважаючи на те, що якість води в контрольному створі КМК (127 км, с. Червоноармійське) відповідає нормативам екологічної безпеки для зрошення та питного водопостачання (за винятком БСК5, ХСК), в цілому відмічено поступове погіршення санітарного стану вод як у водосховищі, так і в магістральному каналі [2]. Проте, в процесі транспортування води по КМК відбувається трансформація її показників якості внаслідок внутрішньоводоймищних фізико-хімічних та біологічних процесів.

Важливим біотичним компонентом гідромеліоративних систем Півдня України є поселення двостулкових молюсків роду *Dreissena*, що як представники понто-каспійської фауни до зарегулювання Дніпра існували у Дніпровсько-Бугському лимані. Але після будівництва каскаду водосховищ та пов'язаних з ними систем каналів, почали активне розселення [3]. Цьому сприяла наявність великої площі штучних твердих субстратів гідротехнічних споруд, на яких молюски утворюють поселення, щільність яких досягає десятків тисяч особин на м<sup>2</sup> за біомаси 20-50 кг/м<sup>2</sup>. У технічному аспекті молюски роду *Dreissena* в зрошувальних каналах виступають чинником біологічних перешкоди в експлуатації штучних водотоків, ускладнює прохід води і вимагає постійної чистки від обростання [4]. Проте, залишається недооціненою роль молюсків-фільтраторів у формуванні якості води у меліоративних системах.

Тому метою представленої роботи було оцінити роль обростань молюсків-фільтраторів у

очищенні зрошувальних вод від зависів та виведенні з товщі води деяких високотоксичних важких металів Cr, Ni, Co, Pb та Cd.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Загальну седиментаційну активність угруповань *Dreissena* було оцінено для 3 ділянок каналу: I – 1-55 км від ГНС, II – 55-128 км, III – 128-132 км з врахуванням загальних запасів молюсків на момент проведення досліджень (рис. 1). Отримані величини було екстрапольовано на весь період вегетаційного сезону, що дозволило оцінити вплив угруповань двостулкових молюсків КМК на процеси очищення води від зависів.

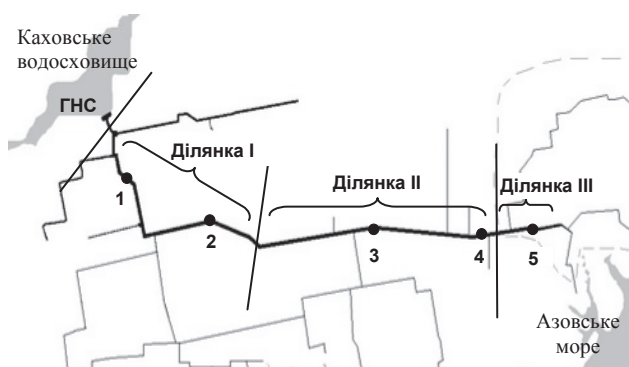


Рис. 1 - Схема розташування станцій спостереження на ділянках Каховського магістрального каналу

Fig. 1 – The plan of research stations on sections of the Kakhovka Main canal

Основним методом оцінки седиментаційної активності двостулкових молюсків, який використовують більшість дослідників, є лабораторний експеримент із застосуванням акваріумних систем, в яких розміщуються молюски та додається певна кількість зависів для створення визначеної концентрації [5-7]. Незважаючи на контрольованість умов лабораторного експерименту, невизначеність окремих факторів впливає на значну мінливість оцінки седиментаційної активності молюсків навіть у межах одного експерименту. Крім того, отримані величини седиментаційної активності не дозволяють екстрапольовувати результати на реальні умови, оскільки для природної екосистеми характерні коливання температури, освітленості, течій та хвиль, складна розмірна структура поселень молюсків тощо.

Тому для оцінки реальних величин седиментаційної активності успішно використовують метод польового експерименту із застосуванням седиментаційних пасток [8-10]. Було використано скляні лійки В-150-230 зовнішнім діаметром 150 мм, висотою до стебла 120 мм. Для збору осаду на кінець стебла прикріплювали склянку

об'ємом 100 мл. Молюсків розміщували на пластикову круглу сітку діаметром 80 мм з вічком 10×10 мм на висоті 80 мм, що перешкождала потраплянню молюсків до збірної склянки, але не затримувала проходження осаду. На відміну від дослідів інших авторів, де на сітку розміщували поодинокі особини *Dreissena* після їх відокремлення від субстрату, ми розташовували фрагмент нативного поселення молюсків разом із субстратом або окрему друзу після її ретельного промивання. Відбір поселень проводили безпосередньо в місці розташування седиментаційних пасток. Це дозволило досягти 100% виживання молюсків в експериментальних групах при збереженні природного співвідношення видів та розмірно частотної структури їх поселень. Відібрані групи молюсків просушували фільтрувальним папером та зважували з точність до 0,1 г. За наявності субстрату – зважування проводили разом з ним без руйнування поселення. Після розміщення молюсків, пастки залишали відкритими (склянку до стебла не приєднували) на період 5 діб для адаптації та контролю виживання молюсків. Після закінчення експерименту групи молюсків зважували вдруге для оцінки приросту маси. За наявності субстрату його зважування проводили в кінці експерименту та віднімали від початкової та кінцевої маси, що дозволяло оцінити масу поселення молюсків.

Для оцінки величини пасивного гравітаційного осадження зависів одночасно поряд з експериментальними лійками розташовували контрольну седиментаційну пастку, яка являла собою порожню лійку з аналогічно розташованою сіткою, на яку розміщували відповідну кількість закритих порожніх черепашки *Dreissena* та субстрат (у разі його використання). Контрольні седиментаційні пастки використовували для оцінки гравітаційного осідання зависів.

На кожній станції на глибині 1,0-1,5 м було змонтовано по чотири седиментаційні пастки – три експериментальні та одна – контрольна. Період експозиції становив 4 доби. Подібний період (4-7 діб) був використаний іншими авторами [8]. Скорочення періоду експозиції в нашому випадку було викликано намаганням запобігти вторинній реседиментації осаду при заповненні пасток. Крім того, в умовах закритого скляного накопичувача осаду за умов прогрівання води прискорюються мікробіологічні процеси, що можуть змінити масу осаду. Дослідження проводили протягом серпня 2018 р. на 5 станціях та червня-серпня 2020 р. – на трьох. Загальна тривалість експозиції становила у серпні 2018 р. – 14 днів; у 2020 р. – 33 дні.

Після відповідної експозиції седиментаційні пастки обережно виймали, воду разом з осадом з лійки та скляного накопичувача фільтрували на місці через попередньо висушений при температурі 60 °С протягом однієї доби та зважений з точність до 0,001 г паперовий фільтр «біла стрічка». Після промивки молюсків пастки розміщували у тому ж місці для наступного етапу експозиції. Фільтр висувували при температурі 60 °С та зважували з точність до 0,001 г. Від отриманої величини віднімали початкову масу фільтру, що давало оцінку кількості відфільтрованого осаду. Величину седиментаційної активності розраховували за формулою:

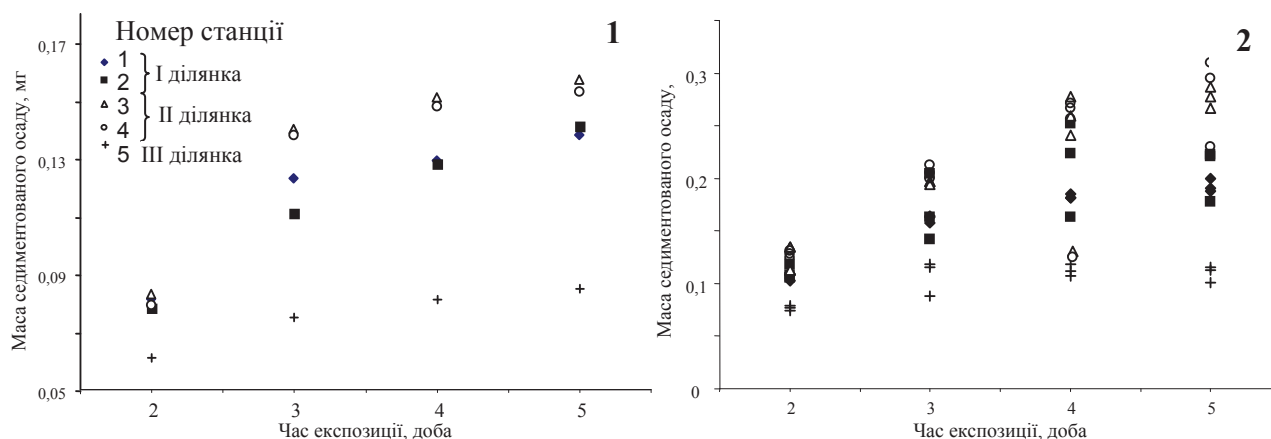
$$SA = (ST - SG) / \left( \frac{M_0 + M_d}{2} \right) \times d,$$

де: *SA* – седиментаційна активність молюсків, мг/г × доба; *ST* – маса осаду, що накопичилася в седиментаційних пастках з молюсками, г; *SG* – маса осаду, що накопичилася в седиментаційних пастках без молюсків, г; *M<sub>0</sub>* – жива маса молюсків на початок експозиції, г; *M<sub>d</sub>* – жива маса молюсків на кінець експозиції, г; *d* – кількість днів експозиції, доба.

Біомасу молюсків було оцінено шляхом відбору кількісних проб обростань з поверхні субстрату за допомогою гідробіологічного шкребка (ширина леза – 10 см), перефітонних рамок розміром 10 × 10 см або 20 × 20 см з глибини 1,0-3,0 м відповідно раніше опублікованих даних [11]. Концентрацію важких металів в осадах визначали за допомогою атомно-абсорбційного спектрофотометру С115-М1 з комп'ютерно-аналітичним комплексом КАС-101.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На всіх досліджених ділянках КМК було відмічено наявність змішаних поселень двох видів прикріплених двостулкових молюсків *D. polymorpha* та *D. bugensis*, що займали тверді штучні субстрати – бетонні плити облицювання та водовипусків, кам'яні відсіпки. У поселеннях більшості досліджених станцій переважали особини *D. bugensis* (в середньому 60%). Лише у відділеній частині КМК частка особин *D. polymorpha* сягала 64-70%. Оцінки заселеної площі субстратів за визначеними ділянками КМК дали величини для ділянки I – 36,9 га; II – 35,7 га; III – 2,1 га. У серпні 2018 р. на ділянках I та II середня біомаса поселень молюсків коливалася в межах 427 – 531 г/м<sup>2</sup>. У серпні 2020 р. на



**Рис. 2.** – Динаміка процесів накопичення осаду в седиментаційних пастках: 1 - контрольні (без молюсків); 2 – експериментальні (з живими молюсками)

**Fig. 2.** – Dynamics of sediment accumulation processes in sedimentation traps: 1 - control (without mollusks); 2 - experimental (with live mollusks)

ділянках I та II відбулося зростання біомаси поселень на 15-28%. При цьому між ділянками стали помітними відмінності – середня біомаса поселень молюсків на початковій ділянці відповідала діапазону 505 – 619 г/м<sup>2</sup>, а на центральній – 653 – 743 г/м<sup>2</sup>. Протягом всіх років спостережень біомаса молюсків на дистальній частині каналу продемонструвала стабільні показники у діапазоні 266 – 298 г/м<sup>2</sup>.

Процеси гравітаційного осадження водних зависів відрізнялися на досліджених ділянках магістрального каналу (рис. 2). Найбільші обсяги зависів та швидкість накопичення у пастках були характерні для II ділянки, найменші – для III ділянки, що відповідає величині концентрації зависів у воді даних ділянок – найвища концентрація зависів протягом всього періоду дослідження була характерна для центральної ділянки каналу (6-7 мг/л), а найменші – для найвіддаленішої його частини (1,9-2,1 мг/л). Подібна тенденція була характерна і для експериментальних седиментаційних пасток з молюсками, коли найменша інтенсивність накопичення осадів була виявлена для дистальної ділянки каналу.

Протягом всього періоду спостереження максимальні показники седиментації були характерні для поселень *Dreissena* на середній ділянці каналу, які показали двократне зростання у липні-серпні з 1,095±0,169 мг/г×доба до 2,300-2,407 мг/г×доба (табл. 1). При цьому на початковій та дистальній ділянках каналу відмінності виявилися несуттєвими і в червні знаходилися у діапазоні 0,520-0,640 мг/г×доба, а у липні-серпні – 1,326-1,852 мг/г×доба (за виключенням серпня 2018 р., коли на ділянці

III була відмічена висока седиментаційна активність, яка статистично значимо не відрізнялася від серпня 2020 р.). Зазначені відмінності у седиментаційній активності молюсків з різних ділянок КМК на нашу думку пов'язані зі змінами у концентрації зависів у воді. Зокрема стабільні величини були характерні для початкової ділянки каналу, куди надходить вода з Каховського водосховища, концентрація зависів в якому на початку червня 2020 р. становила 2,2-2,3 мг/л і суттєво не змінювалася вздовж каналу. У липні-серпні ситуація кардинально змінюється. Вода на початковій ділянці каналу стає менш прозорою, що відображає процеси цвітіння води в Каховському водосховищі, а концентрація зависів становить 5,5 мг/л. При просуванні водних мас вздовж каналу на середній ділянці інтенсивність цвітіння води зростає і у серпні 2020 р. концентрація зависів сягає 6-7 мг/л. Проте на віддалених ділянках каналу спостерігається різке зменшення концентрації зависів до 1,9-2,1 мг/л.

Оцінка загальної біомаси молюсків показала, що більша частина поселень зосереджена в центральній частині КМК, запаси яких станом на серпень становили 187,4 – 249,9 т. Початкова ділянка каналу, незважаючи на близькі величини площі заселених субстратів, характеризувалася нижчими величинами запасів поселень молюсків, що становили 166,0 – 187,4 т. Найменші запаси були характерні для найвіддаленішої частини каналу, що становили всього 16,6 – 20,7 т.

Для перевірки статистичної значимості відмінностей середніх величин застосовували критерій *U*-критерій Манна-Уїтні за рівнем значимості  $p < 0,05$ .



**Таблиця 1** - Седиментаційна активність моллюсків роду *Dreissena* на різних ділянках Каховського магістрального каналу (червень-серпень 2020 р.)**Table 1** – Sedimentation activity of molluscs of the genus *Dreissena* in different sections of the Kakhovka main canal (June-August 2020)

Ділянка	Рік	Місяць	Седиментаційна активність, мг/г×доба		Біомаса поселень моллюсків, т	Обсяг седиментованого моллюсками осаду, т		Обсяг гравітаційної седиментації, т	
			$\bar{X}$	SD		$\bar{X}$	SD	$\bar{X}$	SD
I	2018	серпень	1,431	0,410	166,0	7,1	2,0	26,2	2,5
		червень	0,529	0,105	191,8	3,0	0,6	8,6	1,0
	липень	1,326	0,287	7,6		1,7	27,7	7,4	
	серпень	1,450	0,233	8,3		1,3	35,5	0,2	
II	2018	серпень	1,734	0,795	187,4	9,7	4,5	21,0	5,6
		червень	1,095	0,169	249,9	8,2	1,3	12,6	1,9
	липень	2,300	0,302	17,2		2,3	43,6	2,5	
	серпень	2,407	0,185	18,0		1,4	45,0	1,1	
III	2018	серпень	2,536	0,330	16,6	1,3	0,2	1,3	0,8
		червень	0,640	0,167	20,7	0,4	0,1	0,8	0,1
	липень	1,359	0,307	0,8		0,2	1,3	0,2	
	серпень	1,852	0,578	1,1		0,4	1,4	0,1	

Аналіз кількості седиментованого осаду показав, що максимальна седиментаційна активність поселень моллюсків спостерігається у середній частині каналу, де протягом літніх місяців моллюсками з товщі води осаджується від  $8,2 \pm 1,3$  т/міс. до  $18,0 \pm 1,4$  т/міс. зависів, що пояснюється як найбільшою біомасою моллюсків на цій ділянці, так і високими показниками седиментаційної активності (1,095-2,407 мг/г×доба). Максимальний обсяг седиментованих зависів припадав на серпень 2020 р. (18,0 т/міс.), що відображає високу каламутність води у цей період. Водночас у серпні 2018 р. обсяг седиментованих зависів виявився майже у 2 рази нижчим (9,7 т/міс.). Концентрація зависів у воді в цей період виявилася дещо нижчою і становила 6,0 мг/л. Також значні обсяги седиментованих зависів поселеннями моллюсків були характерні для початкової ділянки каналу, що відповідали діапазону  $3,0 \pm 0,6$  т –  $8,3 \pm 1,3$  т. Найнижчі обсяги седиментованого осаду були характерні для червня 2020 р. У липні-серпні обсяги седиментації виявилися близькими для 2018 р. та 2020 р. і становили 7,1-8,3 т/міс.

Найнижча кількість седиментованих зависів була характерна для дистальної ділянки каналу, де незважаючи на високі величини седиментаційної активності моллюсків (0,640-2,536 мг/г×доба), їх кількість протягом місяця відповідала діапазону  $0,4 \pm 0,1$  т/міс. –

$1,3 \pm 0,2$  т/міс., що відображає незначну біомасу моллюсків на цій ділянці.

Порівняння седиментаційної активності моллюсків з обсягами гравітаційної седиментації показало, що найбільш інтенсивно пасивне осідання зависів відбувається на першій ділянці. Поселення моллюсків осаджують у 2,9-4,1 рази менше зависів, ніж в результаті гравітаційного осадження. В умовах центральної частини каналу роль поселень моллюсків зростає – обсяг осаджених ними зависів у 1,5-2,5 рази менше, ніж обсяги гравітаційного осадження. Лише в умовах дистальної ділянки каналу роль моллюсків є співставною з процесами гравітаційного осадження, що або відповідає ним (1,3 т у серпні 2018 р.), або є у 1,3-2,0 рази меншою.

Сумарна кількість зависів, вилучених з води поселеннями моллюсків роду *Dreissena* у Каховському магістральному каналі, розрахована за окремими місяцями становить для серпня 2018 р. – 18,1 т, для червня 2020 р. – 11,6 т; для липня – 25,7 т; для серпня – 27,5 т. У цей же час гравітаційне осадження зависів забезпечувало накопичення у донних відкладах у серпні 2018 р. 48,5 т осаду, у червні 2020 р. – 22 т, у липні – 72,6 т, у серпні – 81,9 т. Таким чином, поселення моллюсків-фільтраторів забезпечують прискорення очищення води від зависів на 53% протягом червня, та на 34-37% протягом липня-серпня.

Подібні обсяги седиментованих зависів описано для інших водойм. В умовах р. Маас в літні місяці популяція молюсків роду *Dreissena* седиментує 12,3% зависів [12]. Поселення *D. polymorpha* в Куршської затоки (Балтійське море) в залежності від сезону року забезпечують осадження 10-30% твердих зависів, що відповідає 176 тис. т. [13]. Оцінки седиментованих зависів молюсками роду *Dreissena* в озері Волкер-Зооммер (Нідерланди) протягом року дають величину 49% [14], а в оз. Ері – 40% [8]. Причому, слід враховувати, що осади, сформовані внаслідок седиментаційної активності молюсків, є більш стійкими до ресуспендування, у порівнянні з осадами гравітаційного осідання [15].

Оцінка концентрації важких металів в осадах різного походження виявила тенденції до збагачення седиментованого молюсками осаду на Cr

та Co, у меншому ступені – Ni (рис. 3). Так, концентрація Cr підвищувалася в середньому на 59,5%, або на 15,2-93,5 мг/кг у порівнянні з гравітаційно осадженими осадами. Концентрація Co підвищувалася на 55,9%, або на 0,6-5,7 мг/кг. Концентрація Ni підвищувалася на 46,4%, або на 5,2-12,2 мг/кг. Зростання концентрації Pb виявилось у більшості випадків статистично незначимим – на 12,6%, або на 23,6 мг/кг. Слабко, але статистично значимо збільшувалася концентрація Cd – на 4,3%, або на 0,39 мг/кг.

Аналогічне підвищення вмісту металів у седиментованих *Dreissena* осадах у порівнянні із їх концентрацією у зависях було відмічено для оз. Айзельмер (Нідерланди) [14]. Причому, найбільше збагачення осаду також було характерно для Cr – на 12,9%, або на 16,3 мг/кг. Також сут-

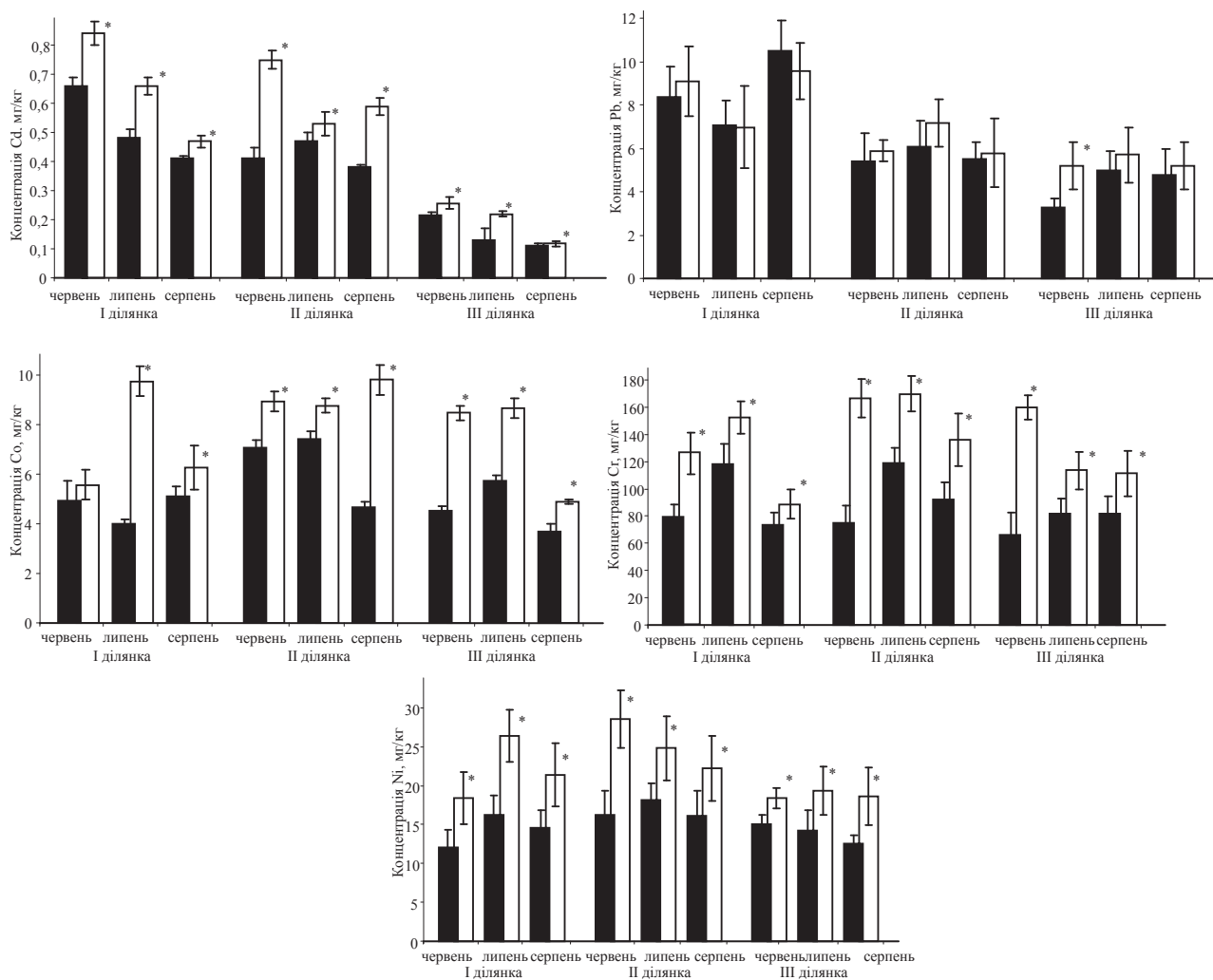


Рис. 3. – Динаміка вмісту важких металів у седиментованих осадах: ■ – гравітаційно осаджені; □ – седиментовані молюсками; \* – статистична значимість відмінностей,  $p < 0,05$ .

Fig. 3. – Dynamics of heavy metals content in deposited sediments: ■ - gravitationally deposited; □ – sedimented by molluscs; \* – the differences are statistically significant,  $p < 0,05$ .

тевим виявилось зростання концентрації Pb – на 12,6%, або на 23,6 мг/кг. Незначно збільшувалася концентрація Cd – на 4,3%, або на 0,39 мг/кг. Водночас за даними [10] найбільш суттєве підвищення у седиментованих молюсками осадах було характерно для Cd (15%) та Cr (13%), але для Cu та Ni відмічено збіднення на 22%, що автор пояснює процесами вилучення хімічних елементів молюсками та накопичення в організмі.

Просторова динаміка вмісту важких металів у седиментованих осадах виявила чітку тенденцію до зниження концентрації Cd та Pb у седиментованих осадах вздовж русла КМК незалежно від їх походження. Для Co та Ni концентрація несуттєво знижувалася лише на III ділянці каналу. Виражена сезонна динаміка була характерна лише для Cd, максимальна концентрація якого у завсях була відмічена у червні і поступово знижувалася до серпня. Все це може відображати джерела надходження даних важких металів до водних екосистем. Зокрема відомо, що Cd та Pb переважно є хімічними елементами антропогенного надходження, у той час як Cr, Co та Ni частково можуть мати теригенне та літогенне походження, надходячи до водних екосистем внаслідок вилуговування з мінералів гірських порід [16].

За даними [17] *Dreissena* в умовах штучної очисної установки забезпечує протягом доби 100% вилучення Cr саме у складі седиментованих зависів. Подібне підвищення вмісту металів у седиментованих *Dreissena* осадах у порівнянні із їх концентрацією у завсях було відмічено для екосистеми озера Айзельмер (Нідерланди) [14]. Причому, найбільше збагачення осаду також було характерно для Cr – на 12,9%, або на 16,3 мг/кг. В умовах оз. Ері поселення молюсків *Dreissena* забезпечують седиментацію 10% від загальної кількості Cu, Zn та 17% – Ni, що міститься у водній товщі висотою 7 м [8].

Отримані величини обсягів осаджених зависів дозволяють оцінити процеси вилучення важких металів з водної товщі за участі молюсків. Найбільші обсяги вилученого металу характерні для Cr. Протягом червня 2020 р. поселення молюсків КМК седиментували  $1,8 \pm 0,3$  кг даного металу, липня –  $3,9 \pm 0,6$  кг, серпня –  $2,7 \pm 0,3$  кг. У серпні 2018 р. обсяги суттєво не відрізнялися і становили  $3,6 \pm 1,4$  кг. Кількість осадженого Ni виявилася суттєво меншою, що становила у червні 2020 р.  $0,297 \pm 0,049$  кг, липні –  $0,65 \pm 0,10$  кг, серпні –  $0,60 \pm 0,07$  кг. У серпні 2018 обсяги були

подібні і становили  $0,54 \pm 0,020$  кг. Ще меншими виявилися обсяги вилученого Co, що протягом червня 2020 р. становили  $0,094 \pm 0,016$  кг, а у липні-серпні різко зростали до  $0,215-0,235$  кг. Дещо меншою кількістю характеризувався Pb з подібною тенденцією зростання обсягів осадження з  $0,078 \pm 0,014$  кг до  $0,182 - 0,191$  кг у липні-серпні 2020 р. Найменші обсяги вилученого металу були характерні для Cd, що у червні 2020 р. оцінювалися у  $0,088 \pm 0,015$  кг, у липні-серпні –  $0,144 - 0,015$  кг, що несуттєво відрізнялося від серпня 2018 р. ( $0,129 \pm 0,047$  кг). Порівняльна оцінка кількості металів, седиментованих різними шляхами, дало величину внеску седиментаційної активності поселень молюсків КМК від 23,3% для осадження Pb, до 52% у випадку осадження Cr. За даними інших авторів в залежності від умов та хімічного елементу молюски роду *Dreissena* забезпечують надходження до донних відкладів від 35% до 400% загальної кількості металу у водній товщі [8].

#### 4. ВИСНОВКИ

Таким чином, завдяки процесам седиментації зависів відбувається зниження каламутності води вздовж Каховського магістрального каналу з 6-7 мг/л в центральній частині (55-128 км) до 1,9-2,1 мг/л у дистальній його частині (128-132 км). Загальна біомаса молюсків у каналі становить 370 – 463 т. Поселення молюсків забезпечують осадження щомісяця 11,6 – 27,5 т зависів, що становить 34 – 53% всіх седиментованих зависів. Завдяки седиментаційній активності до донних відкладів каналу протягом вегетаційного сезону щомісяця осаджується 1,8 – 3,9 кг Cr, 0,3 – 0,6 кг Ni, 0,09 – 0,24 кг Co, 0,08 – 0,18 кг Pb, 0,088 – 0,144 кг Cd. Все це дозволяє стверджувати про важливу роль молюсків-фільтраторів у забезпеченні належної якості води Каховської зрошувальної системи.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осадча Н. М. Баланс стоку гумусових речовин у каскаді Дніпровських водосховищ. *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2012. Вип. 263. С. 81-99.
2. Хохлова Л., Лукашов Д. Якість води у магістральному каналі Каховської зрошувальної системи. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Серія Географія*. 2018. 4(73). С. 24-29.
3. Шевцова Л. В., Харченко Т. А., Понурко Я. В. Расселение дрейссены по каналу Днепр-Донбасс.

Гидротехника и мелиорация. 1985. №12. С. 34-35.

4. Шевцова Л. В., Харченко Т. А. Биологические помехи в закрытой оросительной сети и их устранение. *Достижения научнотехнического прогресса в проекты мелиоративного строительства*. Киев, 1986. С. 134-135.
  5. Klerks P. L., Fraleigh P. C., Lawniczak J. E. Effects of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) on seston levels and sediment deposition in western Lake Erie. *Canadian Journal of Aquatic Sciences*. 1996. 53. Pp. 2284-2291.
  6. Multiple factors regulate filtration by invasive mussels: Implications for whole-lake ecosystems / Xia Z., MacIsaac H. J., Heckyc R. E. et. al. *Science of The Total Environment*. 2021. 765(15). Pp. 144435.
  7. Assessing filtration rates of exotic bivalves: dependence on algae concentration and seasonal factors / Marescaux J. et. al. *Hydrobiology*. 2016. №777. Pp. 67-78.
  8. Klerks P. L., Fraleigh P. C., Lawniczak J. E. Effects of the exotic zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) on metal cycling in Lake Erie. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1997. 54(7). Pp. 1630-1638.
  9. Lukashev D. V. Freshwater Bivalvia as sedimentators of radioactive suspended matter in the cooling pond of the Chernobyl NPS. *Hydrobiol. J.* 2003. 39(6). Pp. 94-101.
  10. Freeman E. Effects of Dreissenid Mussel Druses on heavy metals transfer via benthic macroinvertebrates: Ph.D. Thesis / College of Bowling Green State University, 2013. URL: [https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws\\_etd/send\\_file/send?accession=bgsu1372077038&disposition=attachment](https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_etd/send_file/send?accession=bgsu1372077038&disposition=attachment) (accessed 23.05.2021)
  11. Khokhlova L. K., Lukashov D. V. Peculiarities of the structure of Dreissena settlements in the main canal of the Kakhovka irrigative system. *Hydrobiol. J.* 2020. 56(4). Pp. 33-42.
  12. Quantifying the loss of filtration services following mass mortality of invasive dreissenid mussels / Collas F. P. L., Koopman K. R., van der Velde G. et. al. *Ecological Engineering*. 2020. 149. Pp. 105781
  13. Impact of the zebra mussel *Dreissena polymorpha* invasion on the budget of suspended material in a shallow lagoon ecosystem / Daunys D., Zemlys P., Olenin S. et. al. *Helgoland Marine Research*. 2006. 60. Pp. 113.
  14. Reeders H. H., Bij de Vaate A. Bioprocessing of polluted suspended matter from the water column by the zebra mussel (*Dreissena polymorpha* Pallas). *Hydrobiologia*. 1992. 239. Pp. 53-63.
  15. Roditi H. A., Strayer D. L., Findlay S. E. G. Characteristics of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) biodeposits in a tidal freshwater estuary. *Archiv für Hydrobiologie*. 1997. 140. Pp. 207-219.
  16. Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China / Huang Z., Liu C., Zhao X. et al. *Environ Sci. Eur.* 2020. 32(23).
  17. Removal of metallic elements from real wastewater using Zebra mussel bio-filtration process / Magni S., Parolini M., Soave C. et. al. *J. Environ. Chem. Eng.* 2015. 3. Pp. 915-921.
- ## REFERENCES
1. Osadcha, N.M. (2012). Balans stoku humusovykh rechovyn u kaskadi Dniprovskykh vodoshkovyshch [Balance of runoff of humic substances in the cascade of Dnieper reservoirs]. *Naukovi pratsi Ukrainskoho naukovo-doslidnoho hidrometeorologichnoho instytutu [Scientific works of the Ukrainian research hydrometeorological institute]*, 263, pp. 81-99. (in Ukr.)
  2. Khokhlova, L. & Lukashev, D. (2018). [Quality of water in the main channel of the Kakhovka irrigation system]. *Visnyk Kyivskoho Natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka, Seriya Heohrafiia [Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography]*, 73, pp. 24-29. (in Ukr.)
  3. Shevtsova, L.V., Kharchenko, T.A. & Ponurko, Ya.V. (1985). Rasselenie Drejsseny po kanalu Dnepr-Donbass. [Resettlement of Dreissena along the Dnieper-Donbass channel]. *Gidrotehnika i melioratsiya [Hydrotechnics and Melioration]*, 12, pp. 34-35. (in Russ.)
  4. Shevtsova, L.V. & Kharchenko, T.A. (1986). Biologicheskie pomekhi v zakrytoy orositel'noy seti i ikh ustranenie. [Biological obstacles in a closed irrigation network and their elimination]. *Dostizheniya nauchnotekhnicheskogo progressa v proekty meliorativnogo stroitel'stva [Achievements of scientific and technical progress in meliorative projects design]*. Kiev, pp. 134-135. (in Russ.)
  5. Klerks, P.L., Fraleigh, P.C. & Lawniczak, J.E. (1996). Effects of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) on seston levels and sediment deposition in western Lake Erie. *Canadian Journal of Aquatic Sciences*, 53, pp. 2284-2291.
  6. Xia, Z., MacIsaac, H.J., Heckyc, R.E. et al. (2021). Multiple factors regulate filtration by invasive mussels: Implications for whole-lake ecosystems. *Science of The Total Environment*, 765(15), pp. 144435
  7. Marescaux, J., Falisse, E., Lorquet, J. et al. (2016). Assessing filtration rates of exotic bivalves: dependence on algae concentration and seasonal factors. *Hydrobiology*, 777, pp. 67-78.
  8. Klerks, P.L., Fraleigh, P.C. & Lawniczak, J.E. (1997). Effects of the exotic zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) on metal cycling in Lake Erie. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54(7), pp. 1630-1638.
  9. Lukashev, D.V. (2003). Freshwater Bivalvia as sedimentators of radioactive suspended matter in the cooling pond of the Chernobyl NPS. *Hydrobiol. J.*, 39(6), pp. 94-101
  10. Freeman, E. (2013). *Effects of Dreissenid Mussel Druses on heavy metals transfer via benthic macroinvertebrates*. Ph.D. Thesis. College of Bowling Green State University. Available at: [https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws\\_etd/send\\_file/send?accession=bgsu1372077038&disposition=attachment](https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_etd/send_file/send?accession=bgsu1372077038&disposition=attachment) (accessed 23.05.2021)
  11. Khokhlova, L.K. & Lukashov, D.V. (2020). Peculiarities of the structure of Dreissena settlements in the main canal of the Kakhovka irrigative system. *Hydrobiol. J.*, 56(4), pp. 33-42.
  12. Collas, F.P.L., Koopman, K.R., van der Velde, G. et. al. (2020). Quantifying the loss of filtration services following mass mortality of invasive dreissenid mussels. *Ecological Engineering*, 149, pp. 105781.
  13. Daunys, D., Zemlys, P., Olenin, S. et. al. (2006). Impact of the zebra mussel *Dreissena polymorpha* invasion on the budget of

- suspended material in a shallow lagoon ecosystem. *Helgoland Marine Research*, 60, pp. 113.
14. Reeders, H.H. & Bij de Vaate, A. (1992). Bioprocessing of polluted suspended matter from the water column by the zebra mussel (*Dreissena polymorpha* Pallas). *Hydrobiology*, 239, pp. 53–63.
15. Roditi, H.A., Strayer, D.L. & Findlay, S.E.G. (1997). Characteristics of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) biodeposits in a tidal freshwater estuary. *Archiv für Hydrobiologie*, 140, pp. 207–219.
16. Huang, Z., Liu, C., Zhao, X. et al. (2020). Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China. *Environ Sci. Eur*, 32.
17. Magni, S., Parolini, M., Soave, C. et al. (2015). Removal of metallic elements from real wastewater using Zebra mussel bio-filtration process. *J. Environ. Chem. Eng.*, 3, pp. 915–921.

## EVALUATION OF SEDIMENTATION ROLE OF *DREISSENA* MOLLUSCS' POPULATION IN THE PROCESS OF WATER QUALITY CONTROL IN KAKHOVKA MAIN CHANNEL (KHERSON REGION)

D. V. Lukashov, L. K. Khokhlova

Taras Shevchenko National University of Kyiv  
Volodymyrska Street, 64/13, 01601, Kyiv, Ukraine,  
[ecologyknu@gmail.com](mailto:ecologyknu@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-1375-0447>

Ukraine has a unique natural resources potential and is one of the world's richest agricultural countries in terms of soil composition and land bioproductivity. More than 2/5 of its agricultural land is located within the steppe zone – a zone of unstable and insufficient humidification. The production of agricultural products under arid conditions largely depends on solving the problem of agricultural land artificial irrigation. Due to this, since the 1960s large-scale construction of amelioration facilities took place in Southern Ukraine, including construction of the Kakhovka Reservoir and the Kakhovka Irrigation System, the largest one in Europe. The quality of water intended for irrigation depends on a water source and internal physicochemical/biological processes observed in the amelioration system. The attached bivalve molluscs present an important biotic component of hydrotechnical amelioration systems. They form dense settlements on solid artificial substrates and are usually considered as a source of biological barriers that should be constantly fought against. However, their filtration and sedimentation role can exert influence on the processes of water self-purification. The study aims at evaluating the role of filtering molluscs fouling process when it comes to treatment of irrigation water from suspensions and removal of some heavy metals from the water column. The research is based on the results of field analysis of deposits sedimentation processes in the water column with the help of sedimentation traps at 5 stations along Kakhovka Main Channel. It was found that the total biomass of settlements of attached bivalve molluscs *Dreissena polymorpha* and *Dreissena bugensis* that are present in the channel constitutes about 370 – 463 tons and they contribute to precipitation of 11.6 – 27.5 tons of suspended matter to the bottom sediments during summer months. This process is manifested in a decrease of suspended matter concentration in the water along the channel. Together with suspended matter 1.8 – 3.9 kg of Cr, 0.3 – 0.6 kg of Ni, 0.09 – 0.24 kg of Co, 0.08 – 0.18 kg of Pb, 0.088 – 0.144 kg of Cd also join the bottom sediments every month. Thus, the settlements of molluscs attached to the hydraulic structures can be considered as biological amelioration agents contributing to the improvement of irrigation water quality.

**Keywords:** amelioration and irrigation systems; bivalve molluscs; sedimentation; heavy metals.

## ОЦЕНКА СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ РОЛИ ПОПУЛЯЦИИ МОЛЛЮСКОВ РОДА *DREISSENA* В КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ КАХОВСКОГО МАГИСТРАЛЬНОГО КАНАЛА (ХЕРСОНСКАЯ ОБЛ.)

Д. В. Лукашов, Л. К. Хохлова

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
вул. Владимирская, 60, 01033, Киев, Украина, [ecologyknu@gmail.com](mailto:ecologyknu@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-1375-0447>

Украина имеет уникальный природно-ресурсный потенциал и по качественному составу почв и биопродуктивности угодий является одной из самых богатых аграрных стран мира. Более 2/5 сельскохозяйственных угодий приходится на степную зону - зону неустойчивого и недостаточного увлажнения. В засушливых условиях производство сельскохозяйственной продукции в значительной степени зависит от решения проблемы искусственного орошения сельхозугодий. В связи с этим с 60-х годов XX века на юге Украины было начато крупномасштабное сооружение мелиоративных объектов, в частности построены Каховское водохранилище и крупнейшая в Европе Каховская оросительная система. Качество воды, предназначенной для орошения, зависит от источника поступления и внутренних физико-химических и биологических процессов в мелиоративной системе. Важным биотическим компонентом гидромелиоративных систем являются моллюски-обрастатели, образующие плотные поселения на твердых искусственных субстратах, которые обычно рассматриваются как источник биологических препятствий, с которыми ведут постоянную борьбу. Однако их фильтрационная и седиментационная роль может влиять на процессы самоочищения воды. Целью работы являлась оценка роли обрастаний моллюсков-фильтраторов в очистке оросительных вод от взвесей и выводе из толщи воды ряда тяжелых металлов. Работа основана на материалах полевых исследований процессов оседания взвеси из водной толщи с помощью седиментационных ловушек на 5 станциях вдоль Каховского магістрального каналу. Установлено, что общая биомасса поселений прикрепленных двустворчатых моллюсков *Dreissena polymorpha* и *Dreissena bugensis* в канале составляет 370 - 463 т, которые в течение летних месяцев переводят в донные отложения 11,6 - 27,5 т взвесей, что проявляется в уменьшении концентрации взвешенного вещества в воде вдоль течения каналу. В составе осадков в донные отложения ежемесячно переводится 1,8 - 3,9 кг Сг, 0,3 - 0,6 кг Ni, 0,09 - 0,24 кг Со, 0,08 - 0,18 кг Pb, 0,088 - 0,144 кг Cd. Таким образом, поселения прикрепленных моллюсков на гидротехнических сооружениях могут рассматриваться как биологические мелиораторы, функционирование которых способствует улучшению качества оросительных вод.

**Ключевые слова:** мелиоративные оросительные системы; двустворчатые моллюски; седиментация; тяжелые металлы.

Подання до редакції : 20. 05. 2021  
Надходження остаточної версії : 25. 05. 2021  
Публікація статті : 30. 06. 2021

УДК 504.064.4

## ПЕРЕДУМОВИ ФОРМУВАННЯ І РЕАЛІЗАЦІЇ РЕГІОНАЛЬНОГО ПЛАНУ УПРАВЛІННЯ ТВЕРДИМИ МУНІЦИПАЛЬНИМИ ВІДХОДАМИ В ОДЕСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Т. А. Сафранов, Т. П. Шаніна, В. Ю. Приходько

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, safranov@ukr.net  
<http://orcid.org/0000-0003-0928-5121>

Проблема ефективного управління потоками твердих муніципальних відходів (ТМВ) залишається однією з найбільш актуальних екологічних і соціально-економічних проблем регіонів України. Неефективне управління ТМВ призводить до значного негативного впливу на абіогенні і біогенні складові довкілля, а також на здоров'я населення регіонів України. У кожному регіоні склалася специфічна ситуація, що необхідно врахувати при формуванні і реалізації регіональних планів управління ТМВ. Більшість цих регіональних планів, як правило, обмежуються визначенням обсягів утворення ТМВ, інвентаризацією сміттєзвалищ, розрахунками необхідної кількості контейнерів і технічних засобів, обґрунтуванням доцільності встановлення сортувальних станцій і будівництва нових полігонів ТМВ тощо, але не приділяється належної уваги впровадженню інноваційних підходів до створення ефективної системи управління ТМВ. У вирішенні питання ТМВ відсутній системний підхід, усі зусилля спрямовані на ліквідацію наслідків, а не зміну ситуації з першопричиною. Метою роботи є оцінка передумов формування і реалізації плану управління ТМВ в Одеській області з позицій системного підходу. Методологічну основу роботи складає аналіз існуючої нормативно-законодавчої бази у сфері регіонального управління ТМВ. Робота ґрунтується на опублікованих даних, матеріалах проекту «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року», а також на результатах власних досліджень. Регіональний план управління ТМВ може бути реалізований за такими основними напрямками: впровадження системи поводження з ТМВ у великих населених пунктах (відділення органічної фракції, що легко розкладається, та небезпечних відходів, створення пунктів і центру рециклінгу тощо); робота на полігоні (будівництво сміттесортувального підприємства, створення біохімічної переробки – компостування, отримання біогазу); розробка логістичного обслуговування (перехід на малогабаритні сміттєвози – окремі машини для окремих компонентів ТМВ або машини з окремими секціями без підпресування відходів); підготовка кваліфікованих кадрів, просвітницька робота з широкими верствами населення. Урахування цих передумов при формуванні і реалізації плану управління ТМВ в Одеській області буде сприяти підвищенню екологічної безпеки проживання населення, зменшенню негативного впливу на довкілля шляхом удосконалення і модернізації існуючої системи поводження з ТМВ з кінцевим досягненням стану «нульових відходів» за рахунок переведення максимальної кількості відходів у ліквідну вторинну сировину, альтернативний енергоносіє і екологічно безпечне органо-мінеральне добриво. Втілення концептуально-теоретичних засад щодо формування оптимізованої системи управління ТМВ буде сприяти досягненню цілей сталого розвитку Одеської області.

**Ключові слова:** тверді муніципальні відходи; управління; рециклінг; регіональна програма.

---

### 1. ВСТУП

До твердих муніципальних відходів (ТМВ) відносять відходи від житлового фонду та відходи, що утворюються в офісах, підприємствах громадського харчування, торговельних організаціях, навчальних закладах, лікарнях і т. д. Ці відходи мають різні джерела утворення і різні

властивості, але спільним для них є те, що відповідальність за поводження з ними покладено на муніципальні влади [1]. В останні роки рішення проблем управління ТМВ стають дедалі більш складним. В «Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року» [2] йдеться про проблему відходів як про масштабну, і таку, яка викликана, в першу чергу, до-

мінуванням в національній економіці ресурсоемних багатовідхідних технологій, а також відсутністю ефективного управління відходами.

Неефективне управління ТМВ призводить до значного негативного впливу на абіогенні і біогенні складові доквілля, а також на здоров'я населення регіонів України. Основними тенденціями, пов'язаними з неефективністю системи управління та поводження з ТМВ в регіонах України, є: відсутність системного підходу до вирішення проблеми, значні обсяги утворення і накопичення ТМВ; розміщення абсолютної їх більшості на звалищах; наявність великої кількості стихійних сміттєзвалищ, які не відповідають вимогам санітарно-епідеміологічної та екологічної безпеки; вкрай низька частка утилізації ресурсоцінних складових; низький рівень використання новітніх ефективних підходів і технологій поводження з ними тощо. За останні роки збільшується частка складових ТМВ, які не піддаються швидкій біодеградації, а тому потребують значних площ для розміщення. Слід відмітити також, що облік та статистичні дані щодо ТМВ в Україні мають певні недоліки. Негативні наслідки неефективної системи управління та поводження з ТМВ, стають все більш гострою екологічною і соціально-економічною проблемою, що зумовлює необхідність розроблення і реалізації регіональних планів (програм) управління відходами (РПУВ), зокрема управління ТМВ. У кожному регіоні склалася специфічна ситуація, яку необхідно урахувати при обґрунтуванні регіональних планів управління ТМВ, але принципи підходи до формування цих програм можуть бути багато в чому схожі.

Метою роботи є оцінка передумов формування і реалізації регіональних програм управління твердими муніципальними відходами в Одеській області.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методологічну основу роботи складає аналіз існуючої нормативно-законодавчої бази у сфері регіонального управління з ТМВ. Робота ґрунтується на опублікованих даних, матеріалах проекту «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року», а також на матеріалах власних досліджень.

## 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Стан системи управління та поводження з

відходами в Одеській області є предметом щорічної регіональної доповіді про стан навколишнього природного середовища, статистичних оглядів, спеціальних досліджень, екологічних програм тощо. При цьому, в основному, відомості обмежуються даними про кількість і площу звалищ, обсяги розміщених у спеціально відведених місцях відходів (здебільшого, промислових). Але такий «стандартний» масив інформації не дозволяє повною мірою охарактеризувати екологічні наслідки існуючої ситуації з відходами в Одеській області та визначити ресурсний потенціал таких відходів.

Проводячи аналіз статистичної інформації по відходах з різних джерел інформації (наприкладі Одеської області), можна визначити ряд недоліків, які ускладнюють її практичне використання (насамперед, це стосується якісного наповнення отриманих результатів): 1) відсутність пояснень у довідниках щодо отриманих статистичних показників та методик їх обчислення (наприклад, кількість утворених та розміщених за один рік відходів відрізняється у 1500 раз; ідентичність понять «розміщено відходів у спеціально відведених місцях та об'єктах» та «видалено відходів у спеціально відведених місця та об'єкти»); 2) порушення цілісності масивів інформації (наприклад, по деяким районам Одеської області немає кількості утворених відходів); 3) майже повна відсутність інформації про обсяги утворення ТМВ.

Відповідно «Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року» [2] розробка регіональних планів (програм) управління відходами (РПУВ) має на меті сприяти реалізації цієї Стратегії не пізніше ніж через два роки після її схвалення, але запропоновані цільові показники повинні відповідати тим же самим рокам. У Методичних рекомендаціях з розроблення РПУВ, затверджених наказом Міністерства екології і природних ресурсів України від 12.04.2019 р. №142 (далі – «Методичні рекомендації») [3] використовується термін «управління відходами» – збирання, перевезення, оброблення відходів, включаючи нагляд за такими операціями та подальший догляд за об'єктами видалення відходів. У «Методичних рекомендаціях» виділяються муніципальні відходи (окремо побутові відходи; відходи інфраструктури населених пунктів). Побутові відходи – відходи від домогосподарств, включаючи папір, картон, скло, метали, пластик, біовідходи, деревину, текстиль, упаковку, відходи електричного та електронного обладнання, відпрацьовані батарейки, батареї та акумулятори, а також великогабаритні відходи; від-



ходи з інших джерел, якщо ці відходи подібні за своїм складом до відходів з домогосподарств. Відходи інфраструктури населеного пункту: відходи об'єктів благоустрою населених пунктів (включаючи відходи від зелених насаджень); вуличний змет. Оскільки агрегатний (фазовий) стан відходів при тому не ураховується, то представляється можливим використання словосполучення «тверді муніципальні відходи», до потоку яких можуть входити: небезпечні відходи, відходи будівництва та знесення; відходи упаковки; відходи електричного та електронного обладнання; відпрацьовані батареї, батареї та акумулятори; медичні відходи; зняті з експлуатації транспортні засоби тощо.

Розробка регіональних планів управління ТМВ повинна ґрунтуватися на існуючій нормативно-правовій базі (законодавчі документи в сфері поводження з ТМВ, відповідні постанови Кабінету Міністрів України та накази Міністерства екології та природних ресурсів України тощо). В РПУВ рекомендується включати такі основні розділи: характеристика регіону; аналіз поточного стану системи управління відходами в регіоні; планування системи управління відходами в регіоні; індикатори та моніторинг виконання плану; інформація про Стратегічну екологічну оцінку, але проект «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року» (2020 р.) містить лише такі розділи: характеристика регіону; аналіз поточного стану системи управління відходами в регіоні; планування системи управління відходами в регіоні.

У результаті SWOT-аналізу системи управління та поводження з ТМВ в Одесі проаналізовано сильні і слабкі сторони, можливості і загрози, що дає змогу визначити основні напрями формування системи управління та поводження з ТМВ. Систему управління та поводження з ТМВ в Одеській області потрібно формувати і реалізувати за такими напрямками: втілення системи поводження з ТМВ в місті (відділення органічної фракції, що легко розкладається, та небезпечних відходів, створення пунктів і центру рециклінгу тощо); робота на полігоні (будівництво сміттесортувального підприємства, створення біохімічної переробки – компостування, отримання біогазу); розробка логістичного обслуговування (перехід на малогабаритні сміттєвози – окремі машини для окремих компонентів ТМВ або машини з окремими секціями без підпресування відходів); просвітницька робота з населенням, підготовка кадрів, реклама тощо [4].

З урахуванням наведених результатів SWOT-аналізу при формуванні регіональних планів

управління ТМВ в Одеській області доцільно вирішення таких завдань: 1) класифікація і диференціація ТМВ, що дозволить вибрати для кожного відокремленого потоку компонентів ТМВ найбільш ефективні в екологічному і соціально-економічному аспектах методи переробки, утилізації і видалення; 2) інвентаризація існуючих сміттєзвалищ («полігонів»); 3) реалізація заходів щодо ліквідації несанкціонованих звалищ та утилізації частини ТМВ, які накопичені на цих звалищах; 4) рекультивация перенавантажених та закритих полігонів ТМВ; 5) обґрунтування можливості створення нових (резервних) сучасних полігонів для захоронення частини ТМВ, що не підлягають переробленню або утилізації; 6) оцінка масштабів генерації та накопичення ТМВ на території окремих районів; 7) організація ефективної системи збирання, перевезення, переробки та утилізації складових (у т. ч. небезпечної складової) ТМВ; 8) обґрунтування принципів реалізації кластерної стратегії у сфері поводження з ТМВ на території регіонів; 9) обґрунтування доцільності створення центрів переробки та утилізації ТМВ з використанням найкращих доступних технологій вилучення вторинних ресурсів, а також знешкодження та утилізація екологічно небезпечної складової ТМВ; 10) підвищення ефективності цільового використання платежів населення і удосконалення механізмів державного регулювання поводження з ТМВ в умовах ринкової економіки; 11) підвищення кваліфікації кадрів, заподіяних у сфері поводження з ТМВ; 12) реалізація комплексу заходів щодо підвищення рівня екологічної усвідомленості та культури широких верств населення.

Класифікація ТМВ та їх складових є необхідною умовою вирішення проблеми управління та поводження з ними в регіонах України, а тому нами запропоновані новітні підходи щодо принципів, прикладних аспектів класифікації ТМВ і їх складових та поводження з ними [5, 6].

Для оцінки масштабів накопичення ТМВ необхідно провести інвентаризацію їх звалищ, насамперед, несанкціонованих. При цьому необхідно зафіксувати особливості розташування, розміри, можливі джерела надходження, домінуючі компоненти, а також наявність екологічно небезпечних складових звалищ ТМВ. Для перевантажених і закритих звалищ ТМВ доцільно запропонувати рекультиватійні заходи. За даними Департаменту систем життєзабезпечення та енергоефективності Одеської обласної державної адміністрації на території області налічується 628 звалищ («полігонів») ТМВ (у т.ч. 58 –

перевантажених, 104 – не відповідають нормам санітарно-епідеміологічної і екологічної безпеки). Слід зазначити, що кількість місць видалення відходів не повністю відображає рівень техногенного навантаження на територію, оскільки більшість із них має площу майже 2 га, в той час, як площа лише одного полігону ТМВ м. Одеса «Дальницькі кар'єри» складає понад 76 га. В середньому, такі об'єкти займають 0,03% площі області, але, як визначено, характеризуються позитивною динамікою зміни площі та кількості. Актуальною проблемою є потреба у створенні нових місць видалення відходів. Одеська область займає перше місце серед областей України за площею територій, зайнятих під звалищами («полігонами») ТМВ (понад 1040 га), а при створенні нових 17 звалищ («полігонів») ТМВ ця площа буде збільшена ще на 47 га. Розміщення нових звалищ («полігонів») приведе до додаткового техногенного навантаження на складові довкілля. З метою удосконалення системи поводження з ТМВ згідно проекту Програми поводження з твердими побутовими відходами в Одеській області на 2018-2022 роки (Проект USAID «Муніципальна енергетична реформа в Україні», 2017) пропонувалося ліквідувати численні сміттєзвалища і побудувати 4 сучасних міжрайонних полігонів ТМВ у межах 5 кластерів на території Одеської області.

Для реалізації регіонального підходу необхідно обґрунтувати шляхи управління та поводження з ТМВ на всіх стадіях. Але повна переробка та утилізація ТМВ, тобто досягнення рівня нульових відходів (*Zero Waste*), навряд чи можлива в найближчому майбутньому, а тому проектування та створення сучасних полігонів ТМВ є актуальною задачею для всіх регіонів України. Оскільки протягом короткого часу навряд чи вдасться повністю відмовитися від полігонного захоронення, то доцільно обґрунтувати можливість будівництва нових (резервних) полігонів з лініями сортування сміття, технологіями біохімічної переробки (отримання біогазу та екологічно безпечного органіко-мінерального добрива).

Розміщення міжрайонних полігонів ТМВ повинно базуватися на ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основи проектування», які містять вимоги до того, де «полігони ТМВ розміщують», де «розміщення полігонів ТМВ допускається» та де «розміщення полігонів ТМВ не допускається».

Оцінка рівня сприятливості районів і кластерів області для розміщення полігонів ТМВ за окремими показниками: 1) розрахункові обсяги утворення ТМВ, тис. т/рік; 2) відносна площа

звалищ та «полігонів» ТМВ, %; 3) відносна площа ураженості земель ерозійними процесами, %; 4) відносна площа земель з рівнем ґрунтових вод понад 2 метрів, %; 5) відносна площа розвитку карстових процесів; 6) відносна площа розвитку техногенних екзогенних; 7) кількість зсувів у межах району; 8) модуль техногенного навантаження).

Оцінка кожного показника дана в балах (3 бали – сприятливі умови, 2 бали – відносно сприятливі умови, 1 бал – несприятливі умови). Усереднені значення суми значень показників, що розглядаються, для окремих кластерів виглядають таким чином: 1 кластер (північні райони області) – 17,3 балів; 2 кластер (північно-східні райони області) – 16,4 балів; 3 кластер (райони, прилеглі до Одеси) – 13,5 бали; 4 кластер (південно-західні райони області) – 16,0 балів; 5 (південні райони області) кластер – 14,5 бали. (назви і межі районів до адміністративно-територіального поділу Одеської області до 19.07.2020 р.).

Отже, усереднені значення для окремих показників розрізняються незначно. За отриманими даними не представляється можливим рекомендувати конкретні місця для розміщення полігонів ТМВ, але вони є основою для позитивної або негативної оцінки того чи іншого показника в межах окремого району Одеської області [7].

ТМВ складають, орієнтовано, 2,5% від загальної кількості відходів. За даними Мінрегіону, за 2020 рік утворилось 15,4 млн. т ТМВ (54,1 млн. м<sup>3</sup>) які захоронюються на 6 тис. сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 9 тис. га. [8].

У територіальному розрізі у 2018 р. більше всього відходів збирається і перевозиться у Південному регіоні (2,2 млн. т), частиною якого є Одеська область, де обсяги збирання ТМВ склали майже 150 тис. т.

Слід зазначити, що для Одеської області був один з найгірших показників охоплення населення послугами із збирання (72 % дані 2020 р.) та роздільного збирання ТМВ (5,4%) [9].

Кількісні показники утворення побутових відходів від населення Одеської області за 10-річний період наведені в табл. 1.

ТОВ «Український науково-дослідний інститут з розробки та впровадження комунальних програм та проектів» було досліджено емпіричним методом та визначено морфологічний склад твердих побутових відходів м. Одеса у 2018 році, на замовлення Одеської міської ради в рамках програми «Міська комплексна програма енергоефективності у м. Одесі на 2017-2021 роки». Результати досліджень наведені у табл. 2.

**Таблиця 1** – Кількісні показники утворення ТМВ (тис. т) від населення Одеської області за 10-річний період (проект «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року», 2020 р.)

**Table 1** – Quantitative indicators of MSW formation (thousand tons) from the population of the Odessa region over a 10-year period (the draft "Regional waste management plan in the Odessa region until 2030", 2020)

2011 р.	2012 р.	2013 р.	2014 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.	2020 р.
573,26	2065,52	711,43	711,94	711,82	709,741	708,752	707,98	707,53	707,19

*Примітка.* 53,62% припадає на Одесу

**Таблиця 2** – Морфологічний склад ТМВ, що утворюються в житловій забудові Одеси в осінній сезон 2018 року (проект «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року», 2020 р.)

**Table 2** – The morphological composition of MSW formed in the residential buildings of Odessa in the autumn season of 2018 (the draft "Regional waste management plan in the Odessa region until 2030", 2020)

Назва компоненту ТМВ	Багатоквартирні та одно-квартирні будинки з наявністю усіх видів благоустрою	Одноквартирні будинки з присадибною ділянкою з наявністю усіх видів благоустрою
	вміст компоненту у ТМВ, % по масі	
Харчові відходи	29,53	28,42
Папір та картон	4,82	4,96
Відходи пластикових матеріалів (ПЕТ)	13,08 (4,77)	12,74 (3,59)
Скло	12,39	5,57
Чорні метали	0,64	0,80
Кольорові метали	0,28	0,21
Залишок (дрібне будівельне сміття, вуличний змет та ін.)	39,26	47,30
<b>Всього</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

На основі наведених показників морфологічного складу ТМВ, що утворюються у багатоквартирних та одноквартирних будинках з наявністю усіх видів благоустрою м. Одеса вбачається, що найбільший вміст компонентів за об'ємом складають: харчові відходи, полімери та дрібні будівельні відходи, вуличний змет.

Враховуючи, що централізованим збиранням ТМВ охоплено лише 72% населених пунктів Одеської області, а також низький рівень охоплення роздільним збиранням ТМВ (5,4%, впроваджується з метою вилучення лише окремих компонентів (макулатура, скло, метал та пластик), (роздільне збирання ТМВ впроваджується з метою вилучення лише окремих компонентів (макулатура, скло, метал та пластик), можна вважати, що домінуюча частина утворених ТМВ розміщується у спеціально відведених місцях, зокрема на сміттєзвалищах. Оскільки в Одеській області відсутня система окремого збирання небезпечної складової ТМВ, то вони також розміщуються на звалищах (у тому числі медичні відходи). В Одеській області з 2018 р. впроваджується система роздільного збирання ТМВ, вже розміщено 1026 контейнерів (у т. ч. 406 в Одесі) для пластика, склобою, макулатури, металобрухту чорних металів.

Утворення і накопичення ТМВ є процесами, що відбуваються в часі, тому методологія управління їх потоками ґрунтується на динамічному підході. Цілеспрямований ефект від впровадження проекту – мінімізація накопичення ТМВ – одержується в результаті планування, організації, управління і контролю руху матеріальних та пов'язаних з ними інформаційних і фінансових потоків в просторово-часових координатах впродовж всього життєвого циклу ТМВ. Складові ТМВ розглядаються як диференційовані потоки відходів, а саме: 1) органічні відходи, що легко розкладаються (харчові відходи, садово-паркові відходи, відходи ринків тощо); 2) потенційні вторинні матеріальні ресурси (ВМР) – великогабаритні предмети домашнього вжитку (старі меблі, побутова техніка); відходи контейнерного збору (різноманітна тара і упаковка, макулатура, текстиль, метали, скло, шкіра, гума тощо); 3) інертні мінеральні великогабаритні відходи (будівельне сміття); 4) небезпечні відходи (медичні відходи, ртутні лампи, джерела струму, акумулятори) [5].

*Принцип диференціації потоків ТМВ, який покладено в основу регіональних планів управління ТМВ в Одеській області, пропонується реалізувати наступним чином:*

– на початковому етапі життєвого циклу муніципальних ТМВ від загального потоку відходів у момент їх утворення відділяється *потік органічних відходів*, які легко розкладаються; потік формується залежно від місця утворення (тип житлового будинку, об'єкт міської інфраструктури);

– *потік потенційних вторинних матеріальних ресурсів*, що генерується в результаті життєдіяльності міського населення і господарської діяльності об'єктів інфраструктури розподіляється за складовими (старі меблі, побутова техніка) прямують до спеціалізованих організацій для демонтажу з подальшою утилізацією; тара і упаковка, макулатура, текстиль, метали, скло, шкіра, гума збираються в пересувні, маркіровані для кожного виду ВМР контейнери і вивозяться для подальшої переробки або збираються разом та прямують на сміттесортувальні підприємства;

– *інертні мінеральні великогабаритні відходи*, що утворюються при проведенні будівельних і ремонтних робіт в домашньому господарстві і на об'єктах міського підпорядкування вивозяться для виконання планувальних робіт або на переробку;

– *потік небезпечних відходів*, що утворюються в домашньому господарстві і на об'єктах інфраструктури міста, виділяється із загального потоку ТМВ за допомогою організації адресного збору компонентів потоку.

До потоку органічних відходів слід додавати для сумісного перероблення аналогічні відходи харчової промисловості, овочесховищ, підприємств громадського харчування, ринків, списані продукти харчування супермаркетів тощо. Сезонність утворення опалого листя і обрізі дерев та кущів (другої складової даного потоку ТМВ) обумовлює необхідність організації централізованого збору та вивезення цієї субстанції для компостування або анаеробного зброджування на спеціально обладнаних майданчиках або у спеціальному обладнанні (метантенках). Альтернативним варіантом поводження з цим видом органічних відходів у будинках приватного сектора з присадибними ділянками може служити спільне компостування з харчовими відходами. Оскільки система роздільного збирання ТМВ знаходиться у початковому стані, то багато ресурсоцінних компонентів (у т. ч. органічні відходи, що легко розкладаються) потрапляють на звалища (полігони) ТМВ. Органічні відходи, що легко розкладаються, є вторинною сировиною для отримання біогазу і органо-мінерального добрива, а тому при будівництві нових полігонів необхідно планування біохімічної переробки з

екологічно чистого потоку органічних відходів, що дасть змогу одержати екологічно чисте органо-мінеральне добриво та альтернативне джерело енергії. Створення регіональних комплексів з механіко-біологічної обробки відходів передбачається, зокрема, Національною Стратегією. Ситуація ускладнюється тим, що на території Одеської області немає жодного промислового компостеру. Оскільки при захороненні в анаеробних умовах виділяється біогаз, у складі якого домінує такий парниковий газ як метан, здатний до самозаймання, то створення системи його збирання і використання на існуючих і майбутніх полігонах ТМВ є дуже важливою задачею. Біогазова станція, яка побудована на полігоні ТМВ «Дальницькі кар'єри», з потужністю 12 млн м<sup>3</sup> на рік, є першою спробою вирішення цієї задачі.

З урахуванням значних фінансових витрат, першим кроком до диференціації потоків ТМВ може бути обов'язкове відділення органічних відходів, що легко розкладаються, у момент їх утворення, а також небезпечної складової ТМВ. На контейнерному майданчику рекомендується встановлювати чотири контейнери. Перший контейнер з написом «Харчові та рослинні (садово-паркові) відходи» для збирання екологічно чистої органічної компоненти відходів, що легко розкладаються, другий – з написом «Небезпечні відходи» для збирання медичних відходів, ртутних ламп, джерел струму, акумуляторів тощо, третій з написом «Вторинна сировина» – призначений для збирання ресурсоцінних складових ТМВ, які будуть прямувати на сміттесортувальне підприємство, четвертий з написом «Несортовані відходи», вміст якого необхідно сортувати на пункті рециклінгу. Під час епідемії COVID-19 на контейнерних майданчиках повинні бути встановлені спеціальні урни для розміщення використаних захисних масок, рукавичок та інших специфічних медичних відходів. В іншому випадку, за відсутності сортування ТМВ у джерелах утворення, навряд чи вдасться знешкоджувати або знищувати медичні відходи, що потрапляють до контейнерів ТМВ.

Реалізація системи поводження з ТМВ передбачає створення муніципальних центрів рециклінгу ВМР (спеціалізованих комунальних пунктів збирання відходів) на основі модульно-квартирного принципу. До складу центрів доцільно включити координуючу адміністративну групу, склад-накопичувач ВМР і транспортний підрозділ. Основним структурним елементом центрів рециклінгу повинен стати пункт рециклінгу, розташований на місці одного з внутрішньо-квартирних контейнерних майданчиків

та складається з 5 модулів: 1) модуль прийому відокремлених органічних відходів, які легко розкладаються; 2) модуль прийому та сортування стабілізованих потенційних ВМВ; 3) модуль, що виконує функції пункту прийому вторинної сировини і здійснює прийом окремих фракцій потоку ТМВ, відсортованих населенням, за гроші; 4) модуль прийому та розбирання великогабаритних відходів; 5) модуль збору фракції небезпечних побутових відходів [6].

Необхідно передбачити логістичне обслуговування пунктів невеликими мобільними економічними транспортними засобами. При застосуванні запропонованої схеми збирання необхідно передбачити централізоване перевезення зібраних фракцій відходів в одному типі контейнерів в окремих транспортних засобах. По мірі накопичення на пункті рециклінгу маси зібраних окремо відходів, вони транспортуються на склади міського центру рециклінгу або безпосередньо на сміттесортувальні/сміттепереробні підприємства та на промислове знешкодження.

Для вирішення завдання районування території Одеської області за набором показників, що описують розміщення ТМВ, на основі об'єднання адміністративних районів у характерні групи, нами використаний метод багатомірного статистичного аналізу – кластерний аналіз. Використання кластерного аналізу для районування території за комплексом показників, що прив'язані до окремих районів, є зручним та доцільним [10]. Реалізація алгоритму виконано з використанням пакету прикладних програм Statistica 7.0. Метод кластеризації – *k*-середніх. При обробці масиву даних була використана заміна відсутніх даних середніми значеннями. Задана кількість кластерів – 5. При такій заданій кількості кластерів спостерігаються найкращі результати об'єднання у групи зі значущою різницею між отриманими кластерами за показниками, що розглядаються. Наприклад, на території районів Одеської області виділено 5 кластерів за такими показниками: кількість звалищ; площа, яка зайнята під ТМВ; проектна площа полігонів ТМВ, га; проектна маса ТМВ, що будуть розміщені на полігонах, т; частка площі району, зайнята місцями видалення відходів, %; кількість звалищ у перерахунку на 1 тис. мешканців; динаміка зміни середньої площі одного полігону за окремих період [11].

Отримані дані кластерного аналізу можуть бути основою для обґрунтування принципів реалізації кластерної стратегії у сфері поводження з ТМВ на території адміністративних районів Одеської області, а також повинні бути викорис-

тані при визначенні необхідної кількості сміттесортувальних та сміттепереробних підприємств на території області.

При розробці РПУВ розглянуто 4 варіанти поділу території Одеської області на кластери щодо управління побутовими відходами: *сценарій А* – варіант поділу території Одеської області на 5 кластерів щодо управління ТМВ, границі яких проходять по межах районів з колишніми назвами (до 19.07.2020 р.); відповідно до проекту Програми поводження з твердими побутовими відходами в Одеській області на 2018-2022 роки (Проект USAID «Муніципальна енергетична реформа в Україні», 2017); *сценарій Б* – передбачено утворення 7 кластерів щодо управління ТМВ, границі яких проходять по межах районів, назви яких відповідають сучасному адміністративно-територіальному поділу Одеської області після набрання чинності Постанови Верховної Ради України «Про утворення та ліквідацію районів» (після 19.07.2020 р.); *сценарій В1* – передбачено утворення 5 кластерів щодо управління ТПВ, границі яких проходять по межах районів, назви яких відповідають сучасному адміністративно-територіальному поділу Одеської області (при цьому передбачається виділення в межах кластерів окремих підкластерів); *сценарій В2* – передбачено утворення 6 кластерів щодо управління ТМВ, границі яких проходять по межах районів, назви яких відповідають сучасному адміністративно-територіальному поділу Одеської області (при цьому також передбачається виділення в межах кластерів окремих підкластерів).

Для визначення оптимального сценарію основним критерієм вибору є економічний, тобто мінімальні капітальні та експлуатаційні витрати.

Порівняльний аналіз надає перевагу *сценарію В1*, який приймається за основу при плануванні системи управління відходами в Одеській області до 2030 року. Він найбільш логічний в частині рівномірності розподілу основних показників. Можливі рішення, що можуть бути прийняті на його основі, враховують логістику збирання та вивезення відходів, а також рівномірність навантаження на регіональні об'єкти, які будуть розміщені у визначених за даним сценарієм кластерах та підкластерах. За обраним сценарієм розраховані обсяги утворення основних ресурсоцінних компонентів (табл. 3).

Принцип диференціації потоків ТМВ, покладений в основу концепції управління та поводження з ТМВ міських агломерацій [12], є ключовим і при формуванні структури кластера поводження з ТМВ. Кластер у сфері поводження

**Таблиця 3** – Обсяги ТМВ і ресурсоцінних компонентів в їх складі, т (проект «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року», 2020 р.)

**Table 3** – Volumes of MSW and resource-valuable components in their composition, tons (the draft "Regional plan of waste management in the Odessa region till 2030", 2020)

Загальний обсяг ТМВ, т	Харчові відходи	Папір і картон	ВІМ (всього)	РЕТЕ (тара від напоїв)	LDPE (плівка, пакети)	HDPE, PVC, PS	Скло
7244676,05	184228,15	29054,69	88060,33	28211,27	32600,92	27274,94	115930,31

*Примітка:* ВІМ – відходи пластикових матеріалів; РЕТЕ – поліетилентерфталат; LDPE – поліетилен низької щільності; HDPE – поліетилен високої щільності; PVC – полівінілхлорид; PS – полістирол.

з ТМВ є багатогалузевим, а тому у ньому повинні бути присутніми об'єкти таких типів:

- 1) «ядро» – об'єкти, навколо яких групується кластер, що виконують основний вид діяльності, – випускають кінцеву продукцію;
- 2) «доповнюючі» – об'єкти, які безпосередньо забезпечують функціонування об'єктів «ядра»;
- 3) «обслуговуючі» – об'єкти, наявність яких є обов'язковою, але діяльність яких безпосередньо не пов'язана з функціонуванням об'єктів «ядра»;
- 4) «допоміжні» – об'єкти, наявність яких бажана, але не обов'язкова для функціонування інших об'єктів кластера.

Нами розроблена структура кластера у сфері поводження з ТМВ для Одеської області [13]. До першого рівня кластера відносяться заклади вищої освіти і НДІ, на базі яких виконують дослідницькі роботи, розробляють технологічні та логістичні ланцюги в сфері поводження з ТМВ та їх компонентами, оцінюють ефективність втілених розробок, наприклад, Одеський державний екологічний університет, Інститут проблем ринку та економіко-екологічних досліджень тощо. Другий рівень кластера поводження з ТМВ складають міський центр рециклінгу, сміттесортувальні підприємства, які надають різноманітні послуги щодо збору, перевезення, сортуванню ТМВ, тобто переведенню їх до стану вторинних матеріальних ресурсів (ВМР) та відділенню небезпечних відходів. До цього рівня кластеру належать підприємства, які використовують одержані ВМР в якості сировини для виготовлення цільової продукції, та підприємства, на яких відбувається знищення/знешкодження небезпечного потоку відходів, вилучених з ТМВ. Сформовані на цьому рівні кластера матеріальні потоки залучаються до сфери матеріального виробництва в якості сировинних та енергетичних ресурсів, що суттєво зменшує техногенне навантаження на довкілля і забезпечує економію природних ресурсів. Умовами реалізації інтересів учасників кластера, які формують його другий рівень, ма-

ють стати наявність доступного обладнання і технологій щодо збору, перевезення та переробки відходів, кваліфікованих кадрів, інноваційних розробок, а також незмінність ринкового попиту на ВМР та вироблену з відходів продукцію. Учасники другого рівня кластера в Одесі – ТОВ «Союз», КП «Одескомунтранс», ТОВ «Екоренсанс», «ТВ-СЕРПУС», «Грін-порт», «Укрекопром» тощо.

Третій рівень кластера поводження з ТМВ – інфраструктурний, який формують організації та установи, що забезпечують діяльність суб'єктів господарювання першого та другого рівнів кластера адміністративними, інформаційними, кадровими, фінансовими та іншими ресурсами, потрібними для їх функціонування, торговельні підприємства по збуту вироблених ВМР і виробленої кінцевої продукції, а також засоби масової інформації, необхідні в процесі формування екологічної свідомості громадян. Учасниками цього рівня кластера мають бути місцеві адміністрації (з житлово-комунальними господарствами), транспортні установи зі спеціалізованими транспортними засобами, торговельні підприємства, установи, які здійснюють підготовку та перепідготовку кадрів відповідної кваліфікації (Одеський державний екологічний університет і Центр післядипломної освіти Одеського державного екологічного університету), міські ЗМІ.

## ВИСНОВКИ

Неефективне управління ТМВ призводить до значного негативного впливу на абіогенні і біогенні складові довкілля, а також на здоров'я населення регіонів України. Регіональний план управління ТМВ в Одеській області потрібно реалізувати за такими основними напрямками: втілення системи поводження з ТМВ (відділення органічної фракції, що легко розкладається, фракції та небезпечних відходів, створення пунктів і центру рециклінгу тощо); робота на полігоні

(будівництво сміттесортувального підприємства, створення біохімічної переробки - компостування, отримання біогазу); розробка логістичного обслуговування (перехід на малогабаритні сміттєвози – окремі машини для окремих компонентів ТМВ або машини з окремими секціями без підпресування відходів); підготовка кадрів, просвітницька робота з населенням, реклама тощо. Урахування цих передумов при формуванні і реалізації плану управління ТМВ в Одеській області сприятиме підвищенню екологічної безпеки проживання населення, зменшенню негативного впливу на довкілля шляхом удосконалення і модернізації існуючої системи поводження з ТМВ з кінцевим досягненням стану «нульових відходів» за рахунок переведення максимальної кількості відходів у ліквідну вторинну сировину, альтернативний енергоносіє і екологічно безпечне органо-мінеральне добриво. Втілення концептуально-теоретичних засад щодо формування оптимізованої системи поводження з ТМВ сприятиме досягненню цілей сталого розвитку Одеської області.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pichtel John. Waste Management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial. 2nd ed. CRC Press, 2014. 682 p.
2. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80> (дата звернення: 25.04.2021 р.).
3. Методичні рекомендації з розроблення регіональних планів управління відходами. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0142737-19#Text> (дата звернення: 25.04.2021 р.).
4. Сафранов Т. А., Шаніна Т. П., Приходько В. Ю. SWOT-аналіз системи управління та поводження з твердими побутовими відходами в Одеській області. *Екологічні науки*. 2020. № 5 (32). С. 169-175.
5. Класифікація твердих муніципальних відходів – передумова формування ефективної системи поводження з їх потоками / Сафранов Т. А., Шаніна Т. П., Губанова О. Р., Приходько В. Ю. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2014. №18. С. 30-36.
6. Сафранов Т. А., Шаніна Т. П., Приходько В. Ю. Класифікація твердих побутових відходів як передумова формування системи поводження з ними в регіонах України: монографія / Одеський державний екологічний університет. Дніпро: Видавець Біла К.О., 2018. 100 с.
7. Сафранов Т. А., Черкез С. А., Шаталін С. М. Оцінка сприятливості території Одеської області для розміщення полігонів твердих побутових відходів. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 21. С. 98-109. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.10>
8. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2020 рік. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/>

<teretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vidhodamy-v-ukrayini-za-2020-rik/> (дата звернення: 27.04.2021 р.).

9. Аналітичний звіт «Базове дослідження стану та напрямків розвитку екологічної політики України та перспектив посилення участі організацій громадянського суспільства у розробці та впровадженні політик, дружніх до довкілля» (період: 2018 - січень 2019). Київ, 2019. 117 с.
10. Управління та поводження з відходами: підручник / Шаніна Т. П. та ін.; за ред. проф. Т. А. Сафранова, проф. М. О. Клименко. Одеса: ТЕС, 2012. 272 с.
11. Сафранов Т. А., Приходько В. Ю., Шаніна Т. П. Проблема розміщення відходів на звалищах та полігонах Одеської області. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2016. Вип. 14. С. 83-90.
12. Сафранов Т. А., Губанова Е. Р., Шаніна Т. П. Принципи оброблення і управління потоками твердих побутових відходів в Одеській агломерації. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2005. № 1. С. 5-11.
13. Сафранов Т. А., Шаніна Т. П., Приходько В. Ю., Філатова О. А. Кластеризація як необхідна умова вирішення проблеми умови вирішення проблеми поводження з твердими побутовими відходами. *Людина і довкілля. Проблеми неоекології*. 2017. 3-4 (28). С. 105-113.

#### REFERENCE

1. Pichtel John. (2014). *Waste Management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial*. 2nd ed. CRC Press.
2. *Natsionalna stratehiia upravlinnia vidkhodamy v Ukraini do 2030 roku [National Waste Management Strategy in Ukraine until 2030]*. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80> (Accessed 25 April 2021) (in Ukr.)
3. *Metodychni rekomendatsii z rozroblennia rehionalnykh planiv upravlinnia vidkhodamy [Methodical recommendations for the development of regional waste management plans]*. Available at: [https://menr.gov.ua/files/docs/nakazy/2019/nakaz\\_142.pdf](https://menr.gov.ua/files/docs/nakazy/2019/nakaz_142.pdf) (Accessed 25 April 2021). (in Ukr.)
4. Safranov, T.A., Shanina, T.P. & Prykhodko, V.Yu. (2020). [WOT-analysis of municipal solid waste management and treatment system in the Odessa region]. *Ekolohichni nauky [Environmental sciences]*, 5(32), pp.121-134. (in Ukr.)
5. Safranov, T.A. et al. (2014). [Classification of municipal solid waste - a prerequisite forming an effective treatment with their streams]. *Visnik Odes'kogo derzhavnogo ekolohichnogo universitetu [Bulletin of Odessa state environmental university]*, 18, pp. 30-36. (in Ukr.)
6. Safranov, T.A., Shanina, T.P. & Prykhodko, V.Yu. (2018). *Klasyfikatsiia tverdykh pobutovykh vidkhodiv yak peredumova formuvannia systemy povodzhennia z nymy v rehionakh Ukrainy [Classification of municipal solid waste as a prerequisite for the formation of a solid waste management system in the regions of Ukraine]*. Dnipro: Vydavets Bila K.O. (in Ukr.)
7. Safranov, T.A., Cherkez, Ye.A. & Shatalin, S.M. (2018). [Assessment of the favorable territory of the Odessa region for the placement of landfills for solid household waste]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 21, pp. 98-109. <https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.10> (in Ukr.)

8. Stan sfery povodzhennia z pobutovymy vidkhodamy v Ukraini za 2020 rik [The state of the sphere of household waste management in Ukraine in 2020]. Available at: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zkhk/terretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vidhodamy-v-ukrayini-za-2020-rik/> (Accessed 27 April 2021). (In Ukr.)
9. Analychnyi zvit «Bazove doslidzhennia stanu ta napriamiv rozvytku ekolohichnoi polityky Ukrainy ta perspektyv posylennia uchasti orhanizatsii hromadianskoho suspilstva u rozrobsi ta vprovadzheni polityk, druzhnikh do dokillia» (period: 2018 - sichen` 2019). [Analytical report "Basic study of the state and directions of development of environmental policy of Ukraine and prospects for strengthening the participation of civil society organizations in the development and implementation of environmentally friendly policies" (period: 2018 - January 2019)]. Kyiv. (in Ukr.)
10. Shanina, T.P., Safranov, T.A., Klymenko, M.O. et al. (2012). *Upravlinnia ta povodzhennia z vidkhodamy [Waste management]*. Odesa: TES. (In Ukr.)
11. Safranov, T.A., Shanina, T.P. & Prykhodko, V.Yu. (2016). [The waste deployment of the rubbish dump and polygons in Odesa oblast]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Serii «Ekolohiia» [Bulletin of KhNU named after VN Karazina. Ecology series]*, 14, pp. 83-90. (in Ukr.)
12. Safranov, T.A., Gubanova, O.R. & Shanina, T.P. (2005). Printsypy obrashcheniya i upravleniya potokami tverdyykh bytovykh otkhodov v Odesskoy aglomeratsyi. *Visnik Odes'kogo derzhavnogo ekolohichnogo universitetu [Bulletin of Odessa state environmental university]*, 11, pp. 1-5. (in Russ.)
13. Safranov, T.A. et al. (2017). The clustering as a necessary condition to solve the problem of municipal solid waste treatment. *Liudyna i dokillia. Problemy neokolohii [Man and the environment. Problems of neocology]*, 3-4 (28), pp. 105-113. (in Ukr.)

## PREREQUISITES FOR FORMATION AND IMPLEMENTATION OF A MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT PLAN IN ODESA REGION

T. A. Safranov, T. P. Shanina, V. Yu. Prykhodko

Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, [safranov@ukr.net](mailto:safranov@ukr.net)  
<http://orcid.org/0000-0003-0928-5121>

The problem of efficient management of municipal solid waste (MSW) flows remains one of the most urgent environmental and socio-economic problems of the Ukrainian regions. Ineffective MSW management leads to a significant negative impact on the abiotic and biogenic components of the environment, as well as on the Ukrainian regions' citizens' state of health. Each individual region has its specific situation that should be taken into consideration for the development and implementation of regional plans for MSW management. Usually most of these regional plans are limited by such factors as determination of the volume of generated MSW, inventory of landfills, calculation of the required number of containers and technical means, justified expediency of MSW sorting stations placement, new MSW landfills construction etc. However, little attention is paid to introduction of innovative approaches for development of an effective MSW management system. There is no systematic approach to solving the MSW-related problem and all efforts aim at eliminating the consequences, rather than changing the ultimate cause. The aim of the research is to assess the prerequisites for the formation and implementation of a MSW management plan in Odesa Region from a systematic approach perspective. The methodological basis of the research includes analysis of the existing regulatory and legislative framework in the area of regional MSW management. The work is based on the relevant published data, materials of the Draft Regional Waste Management Plan in Odesa Region by 2030, as well as the results of our own research activities. The regional MSW management plan can be implemented at the following main areas: introduction of a MSW management system in big cities (separation of easily-decomposed organic fraction and hazardous waste, creation of recycling centre and stations etc.); landfill activities (construction of waste sorting plant, construction of biochemical processing/composting facilities, biogas production); development of logistics services (transition to small garbage trucks: separate vehicles for individual MSW components or vehicles with separate sections without waste precompaction); training of qualified personnel, educational work with great masses of population. Consideration of these prerequisites during the formation and implementation of a MSW management plan in Odesa Region will help to increase the environmental safety of the population, reduce the negative impact on the environment through improvement and modernization of the existing MSW management system and achievement of the final "zero waste" condition after conversion of the maximum waste amount into liquid secondary raw materials, alternative energy source and environmentally friendly organic mineral fertilizer.



The implementation of the conceptual and theoretical foundations for formation of an optimized MSW management system will contribute to the achievement of the goals of sustainable development set by Odesa Region.

**Key words:** municipal solid waste; management; recycling; regional program.

## ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ РЕГИОНАЛЬНОГО ПЛАНА УПРАВЛЕНИЯ ТВЕРДЫМИ МУНИЦИПАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ В ОДЕССКОЙ ОБЛАСТИ

Т.А. Сафранов, Т. П. Шанина, В. Ю. Приходько

*Одесский государственный экологический университет*  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [safranov@ukr.net](mailto:safranov@ukr.net)  
<http://orcid.org/0000-0003-0928-5121>

Проблема эффективного управления потоками твердых муниципальных отходов (ТМО) остается одной из наиболее актуальных экологических и социально-экономических проблем регионов Украины. Неэффективное управление ТМО приводит к значительному негативному влиянию на абиогенные и биогенные составляющие окружающей природной среды, а также на здоровье населения регионов Украины. В каждом регионе сложилась специфическая ситуация, что необходимо учитывать при формировании и реализации региональных планов управления ТМО. Большинство этих региональных планов, как правило, ограничиваются определением объемов образования ТМО, инвентаризацией свалок, расчетами необходимого количества контейнеров и технических средств, обоснованием целесообразности установления сортировочных станций и строительства новых полигонов ТМО и т.п., но не уделяется должного внимания внедрению инновационных подходов к созданию эффективной системы управления ТМО. В решении вопроса ТМО отсутствует системный подход, все усилия направлены на ликвидацию последствий, а не на изменение ситуации с первопричиной. Целью работы является оценка предпосылок формирования и реализации плана управления ТМО в Одесской области с позиций системного подхода. Методологическую основу работы составляет анализ существующей нормативно-законодательной базы в сфере регионального управления ТМО. Работа основывается на опубликованных данных, материалах проекта «Регионального плана управления отходами в Одесской области до 2030 года», а также на результатах собственных исследований. Региональный план управления ТМО может быть реализован по следующим основным направлениям: внедрение системы обращения с ТМО в крупных населенных пунктах (отделение легкоразлагаемой органической фракции и опасных отходов, создание пунктов и центра рециклинга и т.п.); работа на полигоне (строительство мусоросортировочного предприятия, создание биохимической переработки – компостирование, получение биогаза), разработка логистического обслуживания (переход на малогабаритные мусоровозы – отдельные машины для отдельных компонентов ТМО или машин с отдельными секциями без подпрессовки отходов); подготовка квалифицированных кадров, просветительская работа с широкими слоями населения. Учет этих предпосылок при формировании и реализации плана управления ТМО в Одесской области будет способствовать повышению экологической безопасности проживания населения, уменьшению негативного воздействия на окружающую природную среду путем усовершенствования и модернизации существующей системы обращения с ТМО с конечным достижением состояния «нулевых отходов» за счет перевода максимального количества отходов в ликвидное вторичное сырье, альтернативный энергоноситель и экологически безопасное органоминеральное удобрение. Воплощение концептуально-теоретических основ по формированию оптимизированной системы обращения с ТМО будет способствовать достижению целей устойчивого развития Одесской области.

**Ключевые слова:** твердые муниципальные отходы; управление; рециклинг; региональная программа.

*Подання до редакції : 05. 05. 2021*  
*Надходження остаточної версії : 13. 05. 2021*  
*Публікація статті : 30. 06. 2021*

УДК : 504.054, 574.4

## РОЛЬ ЗЕЛЕНИХ НАСАДЖЕНЬ В МІГРАЦІЇ ТА ФІКСАЦІЇ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ (НА ПРИКЛАДІ НАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКУ «ГОЛОСІЇВСЬКИЙ», м. КИЇВ)

Т. С. Тесьолкіна, Д. В. Лукашов

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
вул. Володимирська 60, 01033, Київ, Україна, [tania.tesolkina@gmail.com](mailto:tania.tesolkina@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-1375-0447>

Забруднення атмосферного повітря важкими металами в урбанізованому середовищі є серйозною загрозою для здоров'я людини та довкілля. Значним рівнем забруднення вирізняється дорожній пил, що характеризується великим вмістом важких металів. Одну із провідних ролей у покращенні якості атмосферного повітря у мегаполісах відіграють зелені насадження. Вони затримують забруднюючі речовини. В основному поллютанти осідають на поверхнях листків рослин, також можуть поглинатися через продиhi. Унаслідок протікання цих процесів, забрудники, разом з опалим листям, в подальшому можуть мігрувати в інші компоненти екосистеми. Важливим компонентом у цій системі є лісова підстилка, що виконує своєрідну тригерну роль – забезпечення регуляції напрямків потоків речовини у системі «листя–підстилка–грунт», втримуючи від вимивання хімічні елементи та рівномірно розподіляючи їх надходження. Таким чином, лісова підстилка є своєрідним біогеохімічним бар'єром, що затримує більшість токсичних металів та відіграє провідну роль у здатності екосистем до саморегуляції.

Тому, метою даної роботи було оцінити роль зелених насаджень у покращенні якості атмосферного повітря міського середовища та попередня оцінка особливостей процесів трансформації важких металів у лісовій підстилці. Модельна ділянка досліджень розташована в межах території Голосіївського лісу, що є частиною НПП «Голосіївський» (м. Київ). Вміст важких металів у лісовій підстилці визначали за допомогою методів атомно-абсорбційної спектрофотометрії. Результати досліджень річної динаміки вмісту *Cu*, *Ni*, *Pb*, *Cd*, *Cr* та *Zn* у лісовій підстилці грабової діброви НПП «Голосіївський» показують, що максимальні концентрації є характерними для літнього періоду, коли запаси підстилки різко зменшуються, мінімальні – для осінньо-зимового, під час її накопичення. Порівняння розподілу вмісту важких металів у листяному та ферментованому шарах показало, що в умовах модельної ділянки, *Zn*, *Cu* та *Ni* переважно акумулюються саме в листяному шарі лісової підстилки. Також, виявлено, що процеси мінералізації листового опаду зумовлюють міграцію *Cu*, *Ni*, *Pb*, *Cd* і *Cr*, та фіксацію *Zn*.

**Ключові слова:** важкі метали; лісова підстилка; аеротехногенне забруднення; зелені насадження; лісова екосистема.

### 1. ВСТУП

Не зважаючи на те, що за даними *EuroStat* за період з 1990 по 2018 рік рівень емісії поллютантів атмосферного повітря знизився, питання якості атмосферного повітря залишається важливим [1]. Особливо актуальною є проблема забруднення атмосфери у населених пунктах з великими промисловими підприємствами та значними показниками щільності населення – мегаполісах та промислових агломераціях. Статистика Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) свідчить, що на забруднене повітря припадає 29% усіх смертей та захворювань від раку легень, 17% – від гострої інфекції нижніх дихальних шляхів, 25% – від ішемічної хвороби серця, 43% – від хронічної обструктивної хвороби легень та 24% смертей від інсульту [2].

Забруднене повітря негативно впливає не ли-

ше на здоров'я людини. Результати дослідження залежності якості повітря та збереження об'єктів культурної спадщини, виявило, що стан колекцій бібліотек, які розташовані в агломераціях великих мегаполісів, є гіршим, ніж стан книг у сільській місцевості. Порівняння друкованих екземплярів одного видання, що розташовані в районах з різним рівнем забруднення атмосферного повітря виявило залежність між швидкістю «старіння» паперу та матеріалів на основі целюлози від рівня забруднення повітря в місці зберігання [3]. Дія окремих поллютантів має значний негативний вплив і на об'єкти скульптури. Виявлено, що довготривале перебування у такому середовищі призводить до корозії металів, руйнування каменю, вицвітання покривних лакофарбових матеріалів [4].

Одним із типів забруднюючих речовин в ат-

мосферному повітрі, що можуть мати серйозний токсичний ефект, є важкі метали, що переважно містяться у складі пилу та аерозолів (PM10 та PM2,5). Зелені насадження, як один із елементів урбанізованого середовища, відіграють значну роль у покращенні екологічного стану міста. Крім регуляції мікроклімату, захисту від шумового забруднення та поліпшення естетичного вигляду міського середовища, зелена інфраструктура міста затримує техногенні важкі метали в атмосферному повітрі. Доповідь *Millennium Ecosystem Assessment* [5] визначає однією із ключових екосистемних послуг, що надають зелені насадження в урбанізованому середовищі, регуляцію якості атмосферного повітря шляхом затримки пилового забруднення та інших токсичних домішок, що становлять загрозу здоров'ю людини та міської екосистеми в цілому. При цьому виникає логічне питання їх подальшої трансформації та міграції. Адже деякі з хімічних елементів активно накопичуються у фітомасі, у той час як інші активно мігрують до лісової підстилки та ґрунту. Тому метою представленої роботи було оцінити роль зелених насаджень у покращенні якості атмосферного повітря міського середовища та попередня оцінка особливостей процесів трансформації важких металів у лісовій підстилці на прикладі модельної ділянки НПП «Голосіївський» (м.Київ).

## 2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Обсяги більшості важких металів, що надходять до земної поверхні з атмосфери внаслідок техногенної діяльності, у багато разів перевищують емісію природних фонових джерел [6]. Так, транспорт, активна промислова діяльність та використання викопних видів палива є основним джерелом забруднення важкими металами міського атмосферного повітря [7]. Джерела таких, токсичних елементів як *Cu*, *Zn* і *Pb* в урбанізованому середовищі в основному пов'язані з викидами двигунів транспортних засобів [8]. Забруднення довкілля *As*, *Cd*, *Cu*, *Ni* і *Zn* відбувається внаслідок активної діяльності металургійної промисловості [9, 10]. Деякі дослідники визначали джерелами *Ni* і *Zn* спалювання викопних видів палива та вихлопні гази автомобілів [11].

Дослідження особливостей забруднення атмосферного повітря поблизу автомобільних доріг населених пунктів виявило значне забруднення пилу важкими металами. Викиди автомобільних двигунів внутрішнього згорання, стирання деталей транспортних засобів (шин, час-

тин автомобіля і т.д.) є додатковими джерелами важких металів [12, 13]. Такий забруднений дорожній пил, потрапляючи в атмосферу, переноситься на великі відстані [14]. Ресуспендований пил при потраплянні в організм людини становить загрозу здоров'ю. Також пил може транспортуватися до водного середовища за рахунок випадання опадів на водну поверхню та поверхневого стоку. Як наслідок, такі процеси можуть спричинити погіршення екологічного стану водних об'єктів.

Серед металів *Pb* і *Cd* мають найбільшу здатність накопичуватися у доквіллі [15]. Варто відзначити, що *Cd*, *Co* та *Ni* за фітотоксикологічною класифікацією є високо небезпечними для рослин, водночас за гігієнічними критеріями відносяться до другого класу небезпеки [16]. Натомість *Pb*, який за гігієнічною класифікацією відноситься до другого класу небезпечності, є малонебезпечним для рослин.

У цілому основним механізмом поліпшення якості атмосферного повітря міською зеленою інфраструктурою є безпосередній бар'єрний шлях. Відомо, що більшість забруднюючих частинок затримуються на поверхні рослини. Проте перехоплені пилоподібні поллютанти здатні ресуспендуватися до атмосфери, змиватися атмосферними опадами або в разі накопичення фітомасою – потрапляти на земну поверхню у складі опалого листя. Крім того рослини здатні поглинати та накопичувати газоподібні та дрібнодисперсні забруднювачі шляхом поглинання їх через продихи, в результаті чого відбувається їх дифузія до міжклітинного простору та накопичення у паренхімі листка [17]. Таким чином, рослини є проміжною ланкою у процесах міграції таких полютантів в умовах урбекосистем.

Більшість досліджень, що були присвячені впливу міської зеленої інфраструктури на якість атмосферного повітря, підтвердили зменшення забруднення компонентів при збільшенні площі зелених насаджень [18]. Міські зелені насадження особливо важливі для скорочення вмісту твердих частинок повітря [17]. Модельним дослідженням було оцінено, що збільшення площі зелених насаджень в Лос-Анджелесі на мільйон дерев призведе до скорочення PM10, зменшення вмісту  $O_3$  та  $NO_2$ . Загальна вартість цієї вигоди оцінювалась на основі сценаріїв високої та низької загибелі дерев у межах від 53 до 83 мільйонів доларів США протягом 35 років. Дослідники припускають, що розвиток міських лісів, особливо в районах з низькою густотою дерев та високим рівнем забруднення PM10, суттєво сприятиме поліпшенню якості повітря у межах

міських кварталів [19].

В Україні на законодавчому рівні питання організації зелених зон (як компонентів санітарно-захисної зони, так і рекреаційних територій) регулюється Державними санітарними правилами планування та забудови населених пунктів (ДСП 173-96) [20]. Згідно пункту 5 промислові, сільськогосподарські та інші об'єкти, що є джерелами хімічного, фізичного та біологічного забруднення навколишнього середовища повинні відокремлюватись від житлової забудови санітарно-захисними зонами. У залежності від ширини санітарно-захисної зони мінімальна площа озеленення повинна складати: до 300 м – 60%, від 300 до 1000 м – 50%, понад 1000 м – 40%. Крім того, встановлено норматив площі озеленених територій загального користування для міст на рівні не менше 10 м<sup>2</sup>/люд., в сільських поселеннях – не менше 12 м<sup>2</sup>/люд.

Особливо актуальним питання захисту атмосферного повітря з використанням зелених зон постає у великих мегаполісах. За високого антропогенного навантаження на цей компонент довкілля зелена інфраструктура залишається одним з найбільш ефективних елементів, що поліпшує його стан. Київ, як найбільше місто України, теж має проблеми погіршення якості повітря. За даними Екологічного атласу Києва щільність викидів від стаціонарних джерел у 6,8 разів перевищувала середнього показника по Україні (станом на 2015 р.) [21]. Загалом, у цьому ж році викиди від стаціонарних та пересувних джерел становило 171 тис. тонн. Серед них 85% припадає на автотранспорт. Фактичний стан розвитку зеленої інфраструктури Києва перебуває на стадії формування, незважаючи на наявність програмного документу «Про затвердження Програми розвитку зеленої зони м. Києва до 2010 року та концепції формування зелених насаджень в центральній частині міста», що була продовжена до 2019 року [22]. У контексті захисту атмосферного повітря за допомогою створення зелених зон на території міста документ визначає, що деревні насадження на вулицях міста є ефективною механічною перешкодою на шляху поширення токсичних речовин. Наявність щільних посадок є надійним бар'єром, що обмежує поширення пилу і газів з проїжджої частини вулиці. Проте фактично облаштування зелених зон столиці – це проведення робіт з благоустрою і створення об'єктів для естетичного задоволення населення без врахування специфічних екологічних потреб. Слід відзначити, що останні 15 років фактична забезпеченість зеленими насадженнями населення м. Києва з міськими лісами

зменшилася з 215,2 м<sup>2</sup>/люд до 118,3 м<sup>2</sup>/люд. (Розраховано авторами на основі Екологічного паспорту м. Києва за 2019 рік).

Моделна ділянка, де проводилися дослідження розташована на території Національного природного парку (НПП) «Голосіївський» – унікальної лісової екосистеми на території України, що розташовується в межах мегаполісу мільйонника. На дану територію здійснюється активне антропогенне навантаження. Згідно з даними Екологічного паспорту міста Києва за 2019 рік, найбільшим джерелом аеротехногенного забруднення у Голосіївському районі міста є ТЕЦ-5 ПАТ «Київенерго» [23]. В останній офіційній публікації, де зазначається кількість викидів металів та їх сполук з даного об'єкту промисловості, цей показник становить 0,15 т/рік (станом на 2010 р.) [24]. Відповідно до Екологічного паспорту міста Києва за 2019 вміст важких металів у атмосферному повітрі був значно нижче рівнів нормативів. Середньорічні концентрації *Pb*, *Cr*, *Cd*, *Cu*, *Ni* та *Zn* у 2019 році на всіх постах спостереження за забрудненням повітря по місту відповідали 0,0-0,1 ГДК<sub>сд</sub>. Максимальні середньомісячні концентрації становили для *Pb* – 0,3 ГДК<sub>сд</sub>, з *Cd* – 0,3 ГДК<sub>сд</sub>, *Cu* та *Ni* – 0,1 ГДК<sub>сд</sub> [23].

Лісова підстилка надзвичайно чутлива до забруднення і є одним із перших компонентів екосистеми, що реагує на зміну умов довкілля. В умовах хімічного забруднення вона є одним з основних акумуляторів поліютантів [25]. Листовий опад або підстилка як найдинамічніша частина ґрунтового покриву є одним головних компонентів лісових екосистем, що визначає характер та інтенсивність процесів кругообігу речовини та виступає основним депо хімічних елементів [26]. Таким чином, вона є важливою структурно-функціональною ланкою, що поєднує фітоценоз, зооценоз та мікробоценоз лісової екосистеми в єдину злагоджену систему. Лісова підстилка є одним з основних акумуляторів поліютантів, тому зміни в ній повинні реєструватися в першу чергу. Саме тому, хімічний склад листового шару підстилки є одним з маркерів ступеню забруднення території [27]. У результаті процесів розкладання підстилки стійкі форми металів перетворюються на лабільні форми – потенційне джерело забруднення довкілля [28]. Метали, що виділяються з розкладом листової підстилки, можуть вимиватися в ґрунт або сорбуватися органічними речовинами поверхні ґрунту. Окремі дослідження вказують на збільшення вмісту металів у підстилці, що розкладається, особливо *Cu*, *Zn* та *Pb* [29]. Факт підвищення

концентрацій, також, пояснюється додатковим внесенням важких металів з атмосферного повітря (пиллом) або вологого осадження [30]. Отже, розуміння механізму вивільнення елементів із підстилки розкладається може допомогти контролювати процеси, що відбуваються у системі «листя-підстилка-грунт».

### 3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Проби підстилки відбирали щомісячно на ділянці плакору грабово-дубової діброви в межах НПП «Голосіївський», що розташована на відстані 500 м від однієї з центральних автомагістралей Києва – проспекту Академіка Глушкова, середня інтенсивність руху на якому за авторськими вимірюваннями становить 4540 автомобілів/година. Площа відбору – 1 м<sup>2</sup>. Підстилку висушували до повітряно-сухого стану в умовах приміщення лабораторії. Після повного висихання, проби зважували з метою визначення запасу підстилки. Підготовлений матеріал визолювали в муфельній печі за температури 450°C. До отриманої золи додавали азотну кислоту, розчин нагрівали, потім відфільтровували суспензію. Вміст важких металів у лісовій підстилці визначали за допомогою атомно-абсорбційного спектрофотометру С115-М1 з комп'ютерно-аналітичним комплексом КАС-101.

### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Лісова підстилка на дослідній ділянці мала виражену двошарову структуру. Верхній горизонт підстилки складається із залишків органічного походження, які майже не втратили своєї морфологічної структури, що дозволяє візуально виділити окремі складові. Від наступного горизонту відділяється легко, між ними існує чітка межа. Під верхнім горизонтом розміщений трухоподібний горизонт, перехід від нього до ґрунту виражений слабше. Результати досліджень вмісту важких металів у шарах представлено на графіках (рис.1). Аналіз річної динаміки вмісту важких металів в листовому шарі лісової підстилки дослідної ділянки НПП «Голосіївський» показав, що максимальні концентрації характерні для кінця весняно-літнього періоду, що знижуються до мінімуму наприкінці осіннього – середини зимового періоду.

Для *Ni* та *Cu* у листовому та ферментованому шарах були виявлені схожі закономірності зміни концентрації протягом року. Так, протягом листопаду-січня концентрація металів у листовому шарі характеризувалася відносною стабільністю ( $9,01 \pm 0,51$ – $12,60 \pm 0,44$  мг/кг для *Cu* та  $11,08 \pm 0,57$ – $14,20 \pm 0,15$  мг/кг для *Ni*), проте

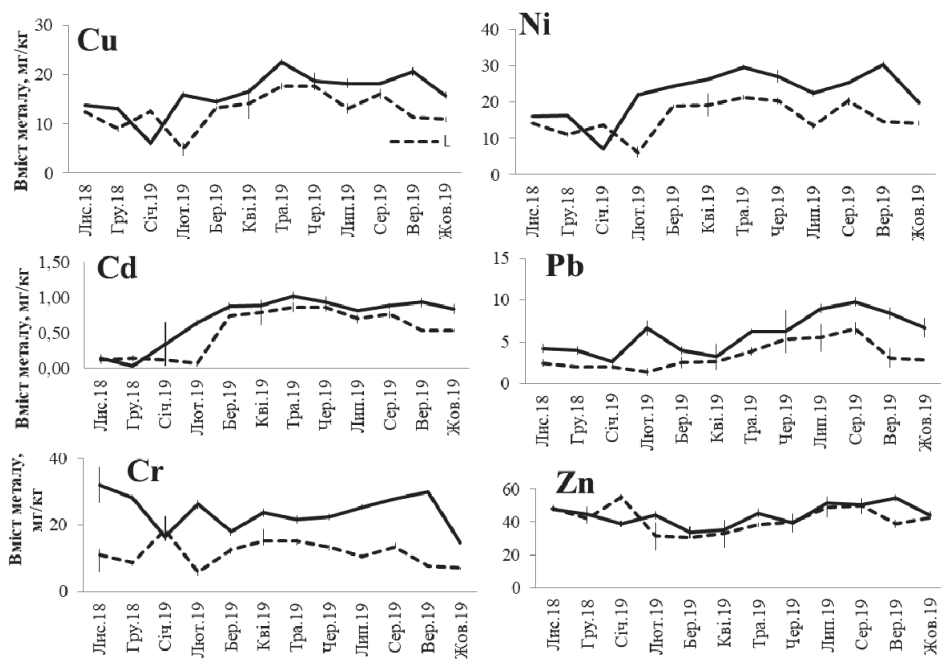


Рис. 1 – Річна динаміка вмісту важких металів у лісовій підстилці НПП «Голосіївський» у 2018-2019 рр.  
Fig. 1 – Annual dynamics of the content of heavy metals in the leaf litter of Holosiivskyi National Nature Park in 2018-2019

у лютому відбувається різке зниження вмісту у 3 рази для  $Cu$  ( $4,87 \pm 1,35$  мг/кг) та у 2 рази для  $Ni$  ( $6,17 \pm 3,19$  мг/кг). У подальшому спостерігається поступове збільшення концентрацій до червня ( $21,25 \pm 0,19$  мг/кг для  $Cu$ ), незначне зменшення у липні і ще один пік у серпні. Найімовірніше, це пов'язано з надходженням свіжого листового опаду, що забруднений важкими металами.

Для ферментованого шару було зафіксовано зменшення концентрації  $Ni$  та  $Cu$  у 2 рази у лютому місяці. Потім спостерігається тенденція до збільшення вмісту цих металів до першого піку у травні. Проте, на відміну від листового шару, другий пік був виявлений у вересні, на місяць пізніше. Це, ймовірно, пояснюється поступовою мінералізацією речовини та міграцією  $Ni$  та  $Cu$  у нижній шар лісової підстилки. Дослідження динаміки вмісту  $Cu$  та  $Ni$  у підстилці неурбанізованих лісів (без поділу на шари) північної Польщі показало подібну тенденцію вмісту металів. Так максимальні концентрації  $Cu$  та  $Ni$  для дубового лісу були характерні для літнього періоду ( $5,2$  мг/кг та  $31,6$  мг/кг відповідно) [28]. Відзначимо, що концентрації міді на цій території були суттєво нижчими у порівнянні з екосистемою НПП «Голосіївський» (у 3,5-4 рази). Проте концентрація  $Ni$  у ферментовану шарі майже не відрізнялася і була в 1,4 рази вищою, ніж у листовому на території НПП «Голосіївський». Виявлено, що на динаміку  $Cu$  у підстилці впливає величина концентрації у ґрунті з накопиченням/вивільненням з цього компонента в залежності від високого/низького рівня вмісту цього металу у ґрунті відповідно [31].

Загальні тенденції зміни протягом року  $Pb$  у листовому шарі характеризуються відносно стабільним вмістом цього металу з листопада до квітня. Потім відбувається поступове збільшення з максимумом у серпні ( $6,60 \pm 0,72$  мг/кг), за яким слідує різке зниження у 2 рази. У ферментованому шарі на фоні відносно стабільного вмісту у листопаді-січні було зафіксовано різке збільшення концентрації у 2,5 рази у лютому. У подальшому концентрація знижується і з квітня, аналогічно листовому шару, відбувається збільшення вмісту до серпня ( $9,80 \pm 0,52$  мг/кг). У вересні-жовтні прослідковується поступове зниження вмісту даного металу. Привертає увагу той факт, що з надходженням великої кількості свіжого листового опаду (у вересні-жовтні) концентрація  $Pb$  зменшується. За даними Watmoug, під час розкладу підстилки  $Pb$  активно вилучався з листового матеріалу та накопичувався у верхньому (0-1 см) шарі ґрунту [32]. Водночас за

даними [33] у лісопаркових зонах м. Слесь саме лісова підстилка є основним акумулятором цього металу.

Вміст  $Cd$  у листовому шарі протягом листопада-лютого характеризувався низькими рівнями ( $< 0,15$  мг/кг). З початком весняного періоду відбувається різке збільшення до  $0,74$  мг/кг. У подальшому концентрація металу досягає максимуму у травні ( $0,87 \pm 0,07$  мг/кг), другий пік – у серпні ( $0,76 \pm 0,05$  мг/кг). Для ферментованого шару поступове збільшення вмісту  $Cd$  було характерне із січня по травень ( $0,15 \pm 0,05$  мг/кг до  $1,02 \pm 0,05$  мг/кг відповідно). Потім другий пік зафіксовано у вересні ( $0,93 \pm 0,06$  мг/кг), на місяць пізніше, ніж у листовому. Аналогічно як і для  $Ni$  та  $Cu$ , відбувається зростання концентрації з надходженням свіжого листового опаду та подальший розклад і міграція металу в нижні ферментовані шари підстилки.

Для хрому у листовому шарі було зафіксовано різке збільшення вмісту у 2,1 рази у січні у порівнянні з груднем, потім зменшення у 3,1 рази у лютому. Далі відбувається поступове збільшення з невеликими підвищеннями у травні ( $15,31 \pm 0,54$  мг/кг) та серпні ( $13,56 \pm 1,10$  мг/кг). Ферментований шар характеризувався досить високими у порівнянні з листовим (у 3 рази більшим) вмістом  $Cr$  протягом листопада-грудня. Далі відбувається різке зменшення вмісту у 1,7 рази у січні і знову збільшення у лютому. Наступне збільшення концентрації відбувається у період з березня до вересня ( $29,95 \pm 0,27$  мг/кг) і зменшення у 2 рази в жовтні.

Досить складною поведінкою характеризувався  $Zn$ , максимальний вміст якого був зафіксований у січні ( $55,00 \pm 1,48$  мг/кг), з березня ( $30,27 \pm 0,26$  мг/кг) фактично спостерігаємо поступове збільшення концентрації в листовому шарі до серпня ( $49,79 \pm 4,63$  мг/кг). Для ферментованого шару збільшення вмісту спостерігається до вересня ( $54,56 \pm 1,74$  мг/кг). У порівнянні з даним польських дослідників, вміст  $Zn$  на нашій модельній ділянці в окремі місяці був у 3 рази вищим [28]. Відзначимо, що найбільша величина концентрації була зафіксована у січні ( $18,6$  мг/кг), мінімальна у жовтні ( $7,9$  мг/кг). У загальному тенденція зміни вмісту цього металу протягом року була схожа з отриманими даними: зменшення у зимовий період, потім поступове збільшення з весни до літа. Дослідження залежності розкладу підстилки та концентрації  $Zn$  виявило на всіх досліджених ділянках абсолютну залежність між збільшенням кон-

центрації цього металу із втратою маси при розкладанні [31].

Ряд накопичення важких металів у листяному шарі лісової підстилки має вигляд:  $Zn$  (55,00 мг/кг) >  $Ni$  (21,25 мг/кг) >  $Cr$  (18,55 мг/кг) >  $Cu$  (17,71 мг/кг) >  $Pb$  (6,60 мг/кг) >  $Cd$  (0,87 мг/кг). Отже, в умовах НПП «Голосіївський»  $Zn$ ,  $Cu$  та  $Ni$  переважно акумулюються в листяному шарі лісової підстилки. Загальна послідовність за концентрацією важких металів у ферментованому шарі лісової підстилки має вигляд:  $Zn$  (54,56 мг/кг) >  $Ni$  (30,29 мг/кг) >  $Cr$  (29,95 мг/кг) >  $Cu$  (22,61 мг/кг) >  $Pb$  (9,80 мг/кг) >  $Cd$  (1,02 мг/кг).

## ВИСНОВКИ

Таким чином, серед екологічних проблем на сьогодні, забруднення атмосферного повітря у містах є однією з ключових. Одним із ефективних засобів, що можуть використовуватися для поліпшення його якості є створення оптимальної зеленої інфраструктури – зелених насаджень різного типу. Проте, не зважаючи на те, що рослини активно затримують пил та інші забруднювачі, токсичні елементи залишаються на поверхні та у складі їх фітомаси і в подальшому можуть мігрувати в інші компоненти довкілля після опадання листя. Процеси мінералізації листового опаду зумовлюють міграцію одних металів, та фіксацію інших.

Результати досліджень річної динаміки вмісту важких металів у лісовій підстилці грабової діброви НПП «Голосіївський» показують, що максимальні концентрації є характерними для літнього періоду, коли запаси підстилки різко зменшуються, мінімальні – для осінньо-зимового під час її накопичення. Найбільш швидко листовим шаром втрачаються  $Cu$ ,  $Ni$ ,  $Pb$  та  $Cd$ . У той час як  $Zn$ , виявляє тенденцію до фіксації у лісовій підстилці.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Air pollution statistics – emission inventories. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Air\\_pollution\\_statistics\\_-\\_emission\\_inventories](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Air_pollution_statistics_-_emission_inventories) (Accessed: 29.04.2021).
- Ambient air pollution. URL: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/ambient-air-pollution> (Accessed: 30.04.2021).
- Trees as natural barriers against heavy metal pollution and their role in the protection of cultural heritage / Kocić K. et al. *Journal of Cultural Heritage*. 2014. 15 (3). Pp. 227-233.
- Atmospheric deposition: Effects on sculptures / Abulude F. O. et al. *Chemistry International*. 2018. 4(2). Pp. 136-145.
- Millennium ecosystem assessment. Ecosystems and human well being: Synthesis. Island Press, Washington, DC, 2005. 154 p.
- Battarbee R. W., Anderson N. J., Appleby P. G. Lake acidification in the United Kingdom 1800-1986: Evidence from analysis of lake sediments. London: ENSIS Ltd., 1988.
- Wei B., Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchem J.* 2010. 94(2). Pp. 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.09.014>
- A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment / Harrison R. M. et al. *Atmos. Environ.* 2003. 37(17). Pp. 2391-2402. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00122-5)
- Source identification, size distribution and indicator screening of airborne trace metals in Kanazawa / Wang X. L. et al. *Japan J. Aerosol. Sci.* 2005. 36(2). Pp. 197-210.
- Park K., Dam H. Characterization of metal aerosols in PM10 from urban, industrial and Asian dust sources. *Environ. Monit. Assess.* 2010. 160(1-4). Pp. 289-300. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0695-6>
- Size distribution of metals in urban aerosols in Seville (Spain) / Fernandez A. J. et al. *Atmos. Environ.* 2001. 35(14). Pp. 2595-2601.
- Li X., Poon C. S., Liu P. S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied Geochemistry*. 2001. 16(11). Pp. 1361-1368. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00045-2).
- Johansson C., Norman M., Burman L. Road traffic emission factors for heavy metals. *Atmospheric Environment*. 2009. 43(31). Pp. 4681-4688.
- Apeageyi E., Bank M. S., Spengler J. D. Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts. *Atmospheric Environment*. 2011. 45(13). Pp. 2310-2330. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.015>.
- Tchounwou P. B. et al. Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*. 2012. Pp. 133-164. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6).
- Риженко Н. Наукові основи фітотоксикологічної оцінки небезпечності металів (Cd, Pb, Co, Ni, Zn) у екосистемах: автореф. дис... д-ра біол. наук: 03.00.16. / НААН України. Київ, 2018.
- Nowak D. J., Gordon M. H. *Air Quality Effects of Urban Trees and Parks* / National Recreation and Park Association, 2010. 48 p.
- Modeled PM 2.5 removal by trees in ten US cities and associated health effects / Nowak D. J. et al. *Environmental Pollution*, 2013. 178. Pp. 395-402.
- Tallis H., Polasky S. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2009. 1162. Pp. 265–283.
- Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів: затверджено наказом Міністерства охорони здоров'я України від 19 червня 1996 р. №173 // Верховна Рада України: сайт. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text> (Accessed: 7.05. 2021).
- Екологічний атлас Києва. Київ: ТОВ «Людопринт-Україна» з іноземними інвестиціями», 2017. 60 с.
- Програма розвитку зеленої зони м. Києва до 2010 року та концепція формування зелених насаджень в

- центральної частині міста: затверджено рішенням Київської міської ради від 19 липня 2005 року № 806/3381 // Ліга. Закон: сайт [http://kmr.ligazakon.ua/SI/TE2/I\\_docki2.nsf/alldocWWW/F568AC23F047A944C22573C00053FA80?OpenDocument](http://kmr.ligazakon.ua/SI/TE2/I_docki2.nsf/alldocWWW/F568AC23F047A944C22573C00053FA80?OpenDocument) (Accessed: 7. 05. 2021).
23. Екологічний паспорт міста Києва за 2019 рік. URL: [https://ecodep.kyivcity.gov.ua/files/2020/9/1/eco\\_pasport\\_2019.pdf](https://ecodep.kyivcity.gov.ua/files/2020/9/1/eco_pasport_2019.pdf). (Accessed: 05. 05. 2021).
  24. Екологічний паспорт міста Києва за 2010 рік. URL: [https://kga.gov.ua/dp.kga.gov.ua/images/files/16\\_eco\\_pasport.pdf](https://kga.gov.ua/dp.kga.gov.ua/images/files/16_eco_pasport.pdf). (Accessed: 05. 05. 2021).
  25. Кожина С., Хилкова Н. Накопление ионов тяжелых металлов в листовом опаде различных видов древесных растений на урбанизированных территориях. *Вестник ОрелГАУ*. 2015. 2(53). С. 29-35.
  26. Wildung R., Gauland T., Buschbom R. The independent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biol. Biochem.* 1975. 7. Pp. 373–378.
  27. Воробейчик Е. Изменение мощности лесной подстилки в условиях химического загрязнения. *Экология*. 1995. 4. С. 278-284.
  28. Jonczak J., Parzych A., Sobisz Z. Dynamics of Cu, Mn, Ni, Sr and Zn release during decomposition of four types of litter in headwater riparian forests in northern Poland. *Forest Research Papers*. 2014. 75(2). Pp. 193-200.
  29. Laskowski R., Berg B. Dynamics of some mineral nutrients and heavy metals in decomposing forest litter. *Scand. J. For. Res.* 1993. 8. Pp. 446-456.
  30. Lomander, A. Organic matter turnover in forest and arable land – temperature and moisture effects and dynamics of heavy metals: diss. of Dr.Sc. / Department of Forest Soils, Uppsala, Sweden; Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria, 2002. 250 p.
  31. Virzo De Santo A. et al. Heavy metals and litter decomposition in coniferous forests. *Developments in Soil Science*. 2002. 28, part A. Pp. 63-78.
  32. Watmough S., Hutchinson T., Dillon P. Lead dynamics in the forest floor and mineral soil in South-Central Ontario. *Biogeochemistry*. 2004. 71(1). Pp. 43-68.
  33. Дубровина О. А., Зубкова Т. В. Содержание свинца и кадмия в почве и органах растений сосны обыкновенной в лесопарковых зонах г. Ельца. *Плодоводство и ягодководство*. 2019. Т. 57. С. 56-60.
- REFERENCES**
1. *Air pollution statistics – emission inventories*. Available at: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Air\\_pollution\\_statistics\\_-\\_emission\\_inventories](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Air_pollution_statistics_-_emission_inventories) (Accessed: 29 April 2021).
  2. *Ambient air pollution*. Available at: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/ambient-air-pollution> (Accessed: 30 April 2021).
  3. Kocić, K. et al. (2014). Trees as natural barriers against heavy metal pollution and their role in the protection of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 15(3), pp. 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.05.001>
  4. Abulude, F.O. et al. (2018). Atmospheric deposition: Effects on sculptures. *Chemistry International*, 4(2), pp. 136-145.
  5. *Millennium ecosystem assessment. Ecosystems and human well being: Synthesis* (2005). Island Press, Washington, DC.
  6. Battarbee, R.W., Anderson, N.J. & Appleby, P.G. (1988). *Lake acidification in the United Kingdom 1800-1986: Evidence from analysis of lake sediments*. London: ENSIS Ltd.
  7. Wei, B. & Yang, L. (2010). A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchem J*, 94(2), pp. 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.09.014>
  8. Harrison, R.M. et al. (2003). A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. *Atmos Environ*, 37(17), pp. 2391-2402. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00122-5)
  9. Wang, X.L. et al. (2005). Source identification, size distribution and indicator screening of airborne trace metals in Kanazawa. *Japan J Aerosol Sci*, 36(2), pp. 197-210.
  10. Park, K. & Dam, H. (2010). Characterization of metal aerosols in PM10 from urban, industrial and Asian dust sources. *Environ Monit Assess*, 160(1-4), pp. 289-300. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0695-6>
  11. Fernandez, A.J. et al. (2001). Size distribution of metals in urban aerosols in Seville (Spain). *Atmos Environ*, 35(14), pp. 2595-2601.
  12. Li, X., Poon, C.S. & Liu, P.S. (2001). Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied Geochemistry*, 16(11), pp. 1361-1368. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00045-2)
  13. Johansson, C., Norman, M. & Burman, L. (2009). Road traffic emission factors for heavy metals. *Atmospheric Environment*, 43(31), pp. 4681-4688.
  14. Apeagyei, E., Bank, M.S. & Spengler, J.D. (2011). Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts. *Atmospheric Environment*, 45(13), pp. 2310-2330. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.015>
  15. Tchounwou, P.B. et al. (2012). Heavy Metal Toxicity and the Environment. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*, pp. 133-164. [https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6)
  16. Ryzhenko, N.O. (2018). *Naukovi osnovy fitotoksikologichnoi otsinky nebespechnosti metaliv (Cd, Pb, Co, Ni, Zn) u ekosystemakh [Scientific principles of phytotoxicological assessment of metals hazard (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn) in ecosystems]*. Abstract of Dr. Sc. in Biology. Kyiv: Institute of Agroecology and Environmental Management of National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. (in Ukr.).
  17. Nowak, D.J. & Gordon, M.H. (2010). *Air quality effects of urban trees and parks*. National Recreation and Park Association.
  18. Nowak, D.J. et al. (2013). Modeled PM 2.5 removal by trees in ten US cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 178, pp. 395-402.
  19. Tallis, H. & Polasky, S. (2009). Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1162, pp. 265–283.
  20. *Derzhavni sanitarni pravyla planuvannia ta zabudovy naselenykh punktiv: zatverdzheno nakazom Ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy vid 19 chervnia 1996 r. №173 [State sanitary rules of planning and development of settlements: approved by the order of the Ministry of Health of Ukraine of June 19, 1996 No. 173]*. Verkhovna Rada of Ukraine. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text>. (Accessed: 7 May 2021).
  21. *Ekologichnyi atlas Kyieva [Environmental atlas of Kyiv city]* (2017). Kyiv : Liudoprynt.
  22. *Prohrama rozvytku zelenoi zony m. Kyieva do 2010 roku ta kontsepsiia formuvannia zelenykh nasadzen v tseentralnii*



- chastyni mista : zatverdzheno rishenniam Kyivskoi miskoi rady vid 19 lypnia 2005 roku № 806/3381 [Kyiv green zone development program until 2010 and the concept of green plantation formation in the central part of the city: approved by the decision of the Kyiv City Council of July 19, 2005 no. 806/3381. Liga.Zakon. Available at: [http://kmr.ligazakon.ua/SITE2/1\\_docki2.nsf/alldocWWW/F568AC23F047A944C22573C00053FA80?OpenDocument](http://kmr.ligazakon.ua/SITE2/1_docki2.nsf/alldocWWW/F568AC23F047A944C22573C00053FA80?OpenDocument). (Accessed: 7 May 2021).*
23. *Ekolohichniy pasport mista Kyieva za 2019 rik [Ecological passport of the city of Kyiv for 2019]. Available at: [https://ecodep.kyivcity.gov.ua/files/2020/9/1/eco\\_pasport\\_2019.pdf](https://ecodep.kyivcity.gov.ua/files/2020/9/1/eco_pasport_2019.pdf). (Accessed: 5 May 2021).*
  24. *Ekolohichniy pasport mista Kyieva za 2010 rik [Ecological passport of the city of Kyiv for 2010]. Available at: [https://kga.gov.ua/dp.kga.gov.ua/images/files/16\\_eco\\_pasport.pdf](https://kga.gov.ua/dp.kga.gov.ua/images/files/16_eco_pasport.pdf). (Accessed: 5 May 2021).*
  25. Konoshina, S.V. & Khilkova, N.L. (2015). [Accumulation of heavy metals in leaf litter of different tree species in urban areas]. *Vestnik OrelGAU [Oryol State Agrarian University Bulletin]*, 2(53), pp. 29-35. (in Russ.). <https://doi.org/10.15217/307127>
  26. Wildung, R., Gauland, T. & Buschbom, R. (1975). The independent effects of soil temperature and qater content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biol. Biochem.*, 7, pp. 373–378.
  27. Vorobeichik, E.L. (1995). Changes in thickness of forest litter under chemical pollution. *Ekologiya [Russian Journal of Ecology]*, pp. 278-284. (in Russ.).
  28. Jonczak, J., Parzych, A. & Sobisz, Z. (2014). Dynamics of Cu, Mn, Ni, Sr and Zn release during decomposition of four types of litter in headwater riparian forests in northern Poland. *Forest Research Papers*, 75(2), pp. 193-200.
  29. Laskowski, R. & Berg, B. (1993). Dynamics of some mineral nutrients and heavy metals in decomposing forest litter. *Scand. J. For. Res*, 8, pp. 446-456.
  30. Lomander, A. (2002). *Organic matter turnover in forest and arable land – temperature and moisture effects and dynamics of heavy metals*. Diss. of Dr.Sc. Uppsala, Sweden: Department of Forest Soils; Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria.
  31. Virzo De Santo, A. et al. (2002). Heavy metals and litter decomposition in coniferous forests. *Developments in Soil Science*, 28, part A, pp. 63-78.
  32. Watmough, S., Hutchinson, T. & Dillon, P. (2004). Lead dynamics in the forest floor and mineral soil in South-Central Ontario. *Biogeochemistry*, 71(1), pp. 43-68.
  33. Dubrovina, O.A. & Zubkova, T.V. (2019). [The content of lead and cadmium in the soil and organs of scots pine in forest park zones yelets]. *Plodovodstvo i yagodovodstvo [Pomiculture and small fruits culture in Russia]*, 57(1), pp. 56-60. (in Russ.). <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2019-57-56-60>.

## ROLE OF GREEN SPACES FOR MIGRATION AND SETTING OF HEAVY METALS (AS ILLUSTRATED BY HOLOSIIVSKYI NATIONAL NATURE PARK, KYIV)

**T. S. Tesolkina, D. V. Lukashov**

*Taras Shevchenko National University of Kyiv,  
60, Volodymyrska St., 01033 Kyiv, Ukraine, [tania.tesolkina@gmail.com](mailto:tania.tesolkina@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-1375-0447>*

Air pollution by heavy metals in the urbanized surroundings presents a serious threat to human health and the environment. Road dust is distinguished as a high-level pollutant and characterized by a significant content of heavy metals. Green spaces play a leading role when it comes to improving the quality of atmospheric air in megalopolises. They trap pollutants. Most of them settle on the surfaces of plant leaves, but some can be also absorbed through the stomata. As a result of these processes, pollutants, along with fallen leaves, can later migrate to other components of the ecosystem. An important component of this system is forest litter that plays a kind of trigger role by regulating the directions of substance flows in the “leaves-litter-soil” system, keeping chemical elements from leaching out and evenly distributing their inflows. Thus, forest litter functions as a sort of biogeochemical barrier and plays a leading role in the ability of ecosystems to self-regulate.

Thus, the purpose of this work was to assess the role of green spaces in improving the quality of atmospheric air in the urban surroundings and to conduct a preliminary assessment of the features of the processes of heavy metals transformation within the forest litter. The model site of research is located within the territory of Holoziivskiy forest, a part of the Holoziivskiy National Nature Park (Kyiv). The content of heavy metals in the forest litter was determined using the methods of atomic absorption spectrophotometry. The results of the study of *Cu*, *Ni*, *Pb*, *Cd*, *Cr* and *Zn* content annual dynamics within the forest litter of the hornbeam forest of the Holoziivskiy National Nature Park show that the maximum concentrations are typical for the summer period, when the litter reserves sharply decrease, and the minimum ones – for the autumn-winter period during their accumulation. Comparison of the distribution of heavy metals content within the leaf and fermented layers showed that, under the conditions of the model area, *Zn*, *Cu*, and *Ni* are

predominantly accumulated right in the leaf layer of the forest litter. Moreover, it was revealed that the processes of leaf litter mineralization lead to migration of *Cu*, *Ni*, *Pb*, *Cd* and *Cr*, and setting of *Zn*.

**Keywords:** heavy metals; forest litter; antropogenic air pollution; green spaces; forest ecosystem.

## РОЛЬ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ В МИГРАЦИИ И ФИКСАЦИИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ (НА ПРИМЕРЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКА «ГОЛОСЕЕВСКИЙ», КИЕВ)

Т. С. Теселкина, Д. В. Лукашов

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,  
ул. Владимирская, 60, 01033, Киев, Украина, [tania.tesolkina@gmail.com](mailto:tania.tesolkina@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-1375-0447>

Загрязнение атмосферного воздуха тяжелыми металлами в урбанизированной среде является серьезной угрозой для здоровья человека и окружающей среды. Значительным уровнем загрязнения отличается дорожная пыль и характеризуется большим содержанием тяжелых металлов. Одну из ведущих ролей в улучшении качества атмосферного воздуха в мегаполисах играют зеленые насаждения. Они задерживают загрязняющие вещества. В основном поллютанты оседают на поверхностях листьев растений, также могут поглощаться через устьица. В результате протекания этих процессов, загрязнители, вместе с опавшими листьями, в дальнейшем могут мигрировать в другие компоненты экосистемы. Важным компонентом в этой системе является лесная подстилка, выполняет своеобразную триггерную роль – обеспечение регуляции направлений потоков вещества в системе «листья-подстилка-грунт», удерживая от вымывания химические элементы и равномерно распределяя их поступления. Таким образом, лесная подстилка является своеобразным биогеохимическим барьером, задерживает большинство токсичных металлов и играет ведущую роль в способности экосистем к саморегуляции.

Поэтому, целью данной работы было оценить роль зеленых насаждений в улучшении качества атмосферного воздуха городской среды и предварительная оценка особенностей процессов трансформации тяжелых металлов в лесной подстилке. Модельный участок исследований расположен в пределах территории Голосеевского леса, является частью НПП «Голосеевский» (г. Киев). Содержание тяжелых металлов в лесной подстилке определяли с помощью методов атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Результаты исследований годовой динамики содержания *Cu*, *Ni*, *Pb*, *Cd*, *Cr* и *Zn* в лесной подстилке грабовой дубравы НПП «Голосеевский» показывают, что максимальные концентрации характерны для летнего периода, когда запасы подстилки резко уменьшаются, минимальные – для осенне-зимнего во время ее накопления. Сравнение распределения содержания тяжелых металлов в листовом и ферментированном слоях показало, что в условиях модельного участка, *Zn*, *Cu* и *Ni* преимущественно аккумулируются именно в листовом слое лесной подстилки. Также, выявлено, что процессы минерализации листового опадания обуславливают миграцию *Cu*, *Ni*, *Pb*, *Cd* и *Cr*, и фиксацию *Zn*.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы; лесная подстилка; аеротехногенное загрязнение; зеленые насаждения; лесная экосистема.

Подання до редакції : 03. 06. 2021  
Надходження остаточної версії : 12. 06. 2021  
Публікація статті : 30. 06. 2021

УДК 504.4:54

## ІРИГАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОД КУЧУРГАНСЬКОГО І БАРАБОЙСЬКОГО ВОДОСХОВИЩ

С. М. Юрасов, В. Д. Караулов, М. Г. Перченко,  
Е. О. Юдина, Н. В. Грабко

Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [urasen54@gmail.com](mailto:urasen54@gmail.com)

Проблема іригації сільгоспугідь півдня України, у тому числі Одеської області, була і залишається дуже актуальною. Обмеженість водних ресурсів іригаційної якості змушує утворювати штучні водойми для накопичення вод з метою їх подальшого використання для поливу. Джерелами підживлення водосховищ на півдні Одеської області як правило є Дунай і Дністер, води яких відповідають іригаційним кондиціям. Але змішування дунайських або дністровських вод з водами природних джерел живлення водосховищ і вплив місцевих чинників формування якості вод призводять до зміни властивостей водних мас. Прикладом може служити водосховище Сасик, води якого після змішування з водами Дунаю придатні для зрошення лише легких, добре проникних та дренажних ґрунтів. Тоді як дунайські води підходять для поливу усіх типів ґрунтів протягом усього теплого періоду року.

У статті надається огляд різних методик іригаційного оцінювання вод. Запропонована детальна типізація іригаційних вод на основі типізації природних вод Альокіна О. А. і таблиця розрахунку концентрації токсичних гіпотетичних солей в водах різних підтипів. Виконано оцінку якості вод Кучурганського і Барабойського водосховищ за розглянутими методиками. Отримано, що іригаційні властивості вод цих водосховищ суттєво відрізняються. Кучурганське водосховище: мінералізація вод протягом 90% теплого періоду (ТП) знаходиться в діапазоні 1-3 г/дм<sup>3</sup>; за класифікацією Костякова А. М. це води з «підвищеною небезпечністю» засолення (категорія 3); кількість токсичних солей не перевищує 2,4 г/дм<sup>3</sup>; води підтипу Пб (84% ТП); склад токсичних солей представлений  $NaCl$  (максимальне значення 0,92 г/дм<sup>3</sup>),  $Na_2SO_4$  (максимальне значення 0,79 г/дм<sup>3</sup>) і  $MgSO_4$  (максимальне значення 1,5 г/дм<sup>3</sup>); сумарний вміст хлориду і сульфату натрію у воді не перевищує норму для поливу легких, добре проникних і дренажних ґрунтів; вміст магнію сприяє осолонцюванню протягом 70-75% ТП. Барабойське водосховище: мінералізація вод не перевищує 1 г/дм<sup>3</sup>; за Костяковим А. М. при поливі потрібен «обережний підхід» (2 категорія) протягом 71% ТП і в 29% – води «добрі» (1 категорія); співвідношення головних іонів відноситься до підтипів Па (53%) і Пб (41%); за Бездніної С. Я. води належать до категорії І (води цілком придатні для зрошення всіх типів ґрунтів) з ймовірністю 65% протягом ТП і до категорії ІІ (придатні для зрошення більшості типів ґрунтів) – 35%; кількість магнію шкідливо впливає на ґрунт протягом 53% ТП.

Води Кучурганського і Барабойського водосховищ придатні для зрошення, але потребують обережного підходу у зв'язку з можливістю магнієвого осолонцювання. Води Барабойського водосховища мають кращі іригаційні властивості, вони придатні для поливу більшості типів ґрунтів, води Кучурганського – тільки для поливу легких, добре проникних та дренажних ґрунтів.

**Ключові слова:** іригаційна оцінка; якість вод; Кучурганське водосховище; Барабойське водосховище; детальна типізація іригаційних вод; осолонцювання.

### 1. ВСТУП

Проблема іригації сільгоспугідь півдня України у тому числі Одеської області була і залишається дуже актуальною. В даний час головою Одеської ОДА підписано меморандум з Державним агентством водних ресурсів України про реконструкцію частини радянських мереж «Нижньодністровської» зрошувальної системи [1]. Ця система охоплює 25-30 тис. га земель, проте,

це лише невелика частина угідь Одещини, для яких необхідне зрошення. Тому пошук нових джерел поливних вод, аналіз іригаційних властивостей існуючих водних об'єктів і вдосконалення методик оцінки якості іригаційних вод є актуальним завданням.

Обмеженість водних ресурсів іригаційної якості змушує утворювати штучні водойми для накопичення вод з метою їх подальшого викорис-

тання для поливу. Джерелами підживлення водосховищ на півдні Одеської області як правило є Дунай і Дністер, води яких відповідають іригаційним кондиціям [2, 3]. Але, змішування дунайських або дністровських вод з водами природних джерел живлення водосховищ і вплив місцевих чинників формування якості вод приводять до зміни властивостей водних мас.

Прикладом може служити водосховище Сасик, води якого після змішування з водами Дунаю придатні для зрошення лише легких, добре проникних та дренажних ґрунтів [4]. Дунайські ж води за мінералізацією і за співвідношенням головних іонів можна рахувати еталоном іригаційних вод півдня України. Вони підходять для поливу усіх типів ґрунтів протягом усього теплого періоду року [3].

Кучурганське і Барабойське водосховища як і Сасик мають природні і штучні джерела живлення. Для них природними джерелами є річки з відповідною назвою, а штучне підживлення відбувається за рахунок вод р. Дністер. Дністровські води на відміну від дунайських мають більшу мінералізацію (в середньому приблизно в 1,4 рази) і більший вміст токсичних іонів, вони сприяють утворенню в ґрунті більшої кількості токсичних солей. У такому зв'язку цікавим стає питання: яки іригаційні властивості мають води згаданих водосховищ, і як ці властивості змінюються протягом теплого періоду.

Дослідження останніх років [5-9] були спрямовані на визначення і аналіз гідрохімічних та гідробіологічних характеристик Кучурганського і Барабойського водосховищ, іригаційні властивості їх вод не розглядалися.

*Метою роботи є оцінка іригаційних властивостей вод Кучурганського і Барабойського водосховищ і їх мінливості протягом теплого періоду року за даними гідрохімічних спостережень Одеського обласного управління водних ресурсів 2007-2017 рр.*

*Об'єкт дослідження – якість вод Кучурганського і Барабойського водосховищ.*

*Предмет дослідження – оцінка мінливості іригаційних властивостей вод Кучурганського і Барабойського водосховищ.*

## 2. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ІРИГАЦІЙНОЇ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ВОД

В роботі [4] дається детальний аналіз методик оцінки іригаційних властивостей вод. Коротко зупинимося на цьому.

Іригаційну класифікацію вод встановлюють за чотирма критеріями:

- концентрація солей;
- співвідношення іонів;
- концентрація токсичних елементів, які можуть негативно вплинути на сільськогосподарські рослини і в цілому на навколишнє середовище;
- концентрація біогенів.

Найбільш важливими є перші два критерії.

*Концентрація солей.* Мінералізацію вод визначають: аніони – хлориди ( $Cl^-$ ), сульфати ( $SO_4^{2-}$ ), карбонати ( $CO_3^{2-}$ ) і гідрокарбонати ( $HCO_3^-$ ); катіони – калій ( $K^+$ ), натрій ( $Na^+$ ), магній ( $Mg^{2+}$ ) і кальцій ( $Ca^{2+}$ ). Часто розглядають карбонати з гідрокарбонатами, а калій з натрієм.

Висока мінералізація вод при поливі може привести до надмірного накопичення солей в кореневмісному шарі ґрунту. Це називають засоленням. Солі, які пригнічують або згубно впливають на сільськогосподарські рослини, знижують урожай і його якість [10, с.8], наступні:  $Na_2CO_3$ ,  $NaHCO_3$ ,  $NaCl$ ,  $CaCl_2$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $MgCl_2$ ,  $MgSO_4$ .

Небезпеку засолення ґрунтів за мінералізацією зрошувальної води Костяков А.Н. оцінює в такий спосіб:

- до  $1,0 \text{ г/дм}^3$  – придатна для зрошення;
- від  $1,0$  до  $1,5 \text{ г/дм}^3$  – обережне зрошення;
- від  $1,5$  до  $3,0 \text{ г/дм}^3$  – необхідний аналіз хімічного складу солей,
- понад  $3 \text{ г/дм}^3$  – не придатна для зрошення [11, с.48];
- до  $0,4 \text{ г/дм}^3$  – хороша вода, придатна для зрошення;
- від  $0,4$  до  $1,0 \text{ г/дм}^3$  – обмежене застосування;
- від  $1,0$  до  $3,0 \text{ г/дм}^3$  – підвищена небезпека для рослин;
- більше  $3 \text{ г/дм}^3$  – вторинне засолення [12, с.51].

У США за мінералізацією використовують інші класифікаційні межі ( $M_o$ ,  $\text{г/дм}^3$ ) [13]:

- $M_o \leq 0,20$  – вода низької солоності, придатна для зрошення більшості культур на більшості ґрунтів;
- $0,20 < M_o \leq 0,50$  – вода середньої солоності, використовують в умовах помірного вилугування, культури середньої солестійкості можна вирощувати, не застосовуючи заходів для боротьби з засоленням;
- $0,50 < M_o \leq 1,00$  – вода високої солоності, навіть при гарному дренажі можуть знадобитися заходи щодо боротьби з засоленням, слід вибрати культури, що мають високу солестійкість;
- $1,00 < M_o \leq 3,00$  – вода дуже високої солоності, непридатна для зрошення в звичайних умовах, полив можливий при умовах високої прони-

кності ґрунтів, наявності дренажу та солестійкості культур.

Засолення ґрунтів характеризується також показником токсичності. Граничний вміст солей, при якому спостерігається пригнічення розвитку сільськогосподарських культур, називають порогом токсичності

Токсичні солі, що зустрічаються у ґрунті і воді, представлені в таблиці 1.

**Таблиця 1** – Токсичність основних солей [10, с.9; 13, с.84; 14, с.386]

**Table 1** - Toxicity of basic salts [10, p.9; 13, p.84; 14, p.386]

$NaCl$	$Na_2SO_4$	$Na_2CO_3$	$NaHCO_3$
$MgCl_2$	$MgSO_4$	$MgCO_3$	$Mg(HCO_3)_2$
$CaCl_2$	$CaSO_4$	$CaCO_3$	$Ca(HCO_3)_2$

Солі вище ризику (табл. 1) є шкідливими для рослин. Найбільш токсичними з них є сода ( $Na_2CO_3$ ,  $NaHCO_3$ ), хлористий ( $NaCl$ ) і сірчано-кислий ( $Na_2SO_4$ ) натрій, хлористий кальцій ( $CaCl_2$ ). Сульфат і хлорид магнію ( $MgSO_4$ ,  $MgCl_2$ ) мають меншу токсичність.

Токсичність солей Ковда В. А. [14, с.386] розташовує у такій послідовності:  $Na_2CO_3 > NaHCO_3 > NaCl > CaCl_2 > Na_2SO_4 > MgCl_2 > MgSO_4$ .

Розчинені у воді солі присутні у вигляді іонів. Однак, іноді придатність води для зрошення встановлюють за вмістом в ній солей [11, с.49]: на добре проникних ґрунтах допустимим є вміст  $Na_2CO_3 < 0,1\%$  (1 г/дм<sup>3</sup>);  $NaCl < 0,2\%$ ;  $Na_2SO_4 < 0,5\%$ . За умови одночасної присутності солей ці границі знижуються. Якщо більшість солей складає  $NaCl$  і  $Na_2SO_4$ , то використання такої води для зрошення можливо лише на легких або дренажних ґрунтах.

Головні іони можуть бути токсичними і нетоксичними. До токсичних відносять іони, здатні утворювати токсичні солі. Завжди токсичними є іони  $Cl^-$  і  $Na^+$ , інші головні іони в залежності від їх взаємного урівноваження можуть бути токсичними і нетоксичними:  $Mg^{2+}$  і  $Ca^{2+}$  з  $Cl^-$  дають токсичні солі, а з  $CO_3^{2-}$  і  $HCO_3^-$  – нетоксичні;  $CO_3^{2-}$  і  $HCO_3^-$  з  $Na^+$  дають найбільш токсичні для рослин солі [15, с.24]. Виділення токсичних іонів зручно виконувати, якщо представити мінералізацію води у вигляді суми гіпотетичних солей [11, с.48, 49; 13, с.84; 16, с.201; 17, с.67; 18, с.389, 390].

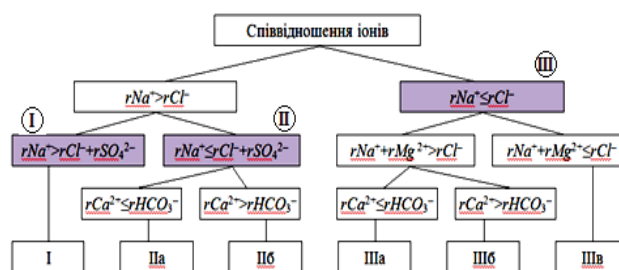
Костяков А. Н. [11, с.48, 49] вказує, що для вод з мінералізацією 1,5-3,0 мг/дм<sup>3</sup> необхідний аналіз хімічного складу солей.

Альокін О. А. вважає, що можна отримати уявлення про склад солей у воді, якщо умовно

допустити, що при випаровуванні води солі будуть випадати при комбінації іонів в наступній послідовності: катіони –  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ; аніони –  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  [18, с.389, 390].

Послідовність комбінування іонів у Довідковому керівництві гідрогеолога [17, с.67] зворотна: аніони –  $Cl^-$ ;  $SO_4^{2-}$ ; ( $CO_3^{2-}+HCO_3^-$ ); катіони – ( $K^++Na^+$ );  $Mg^{2+}$ ;  $Ca^{2+}$ . Але, склад солей буде однаковим як за прямою послідовністю, так і за зворотною.

Типи природних вод I, II і III за Альокіним О.А. [18, с.120] можна розділити на підтипи, що мають різні іригаційні властивості [4], в такому порядку (рис. 1): I, IIa, IIб, IIIa, IIIб, IIIв.



**Рис. 1** – Схема детальної типізації іригаційних вод [4]

**Fig. 1** – Scheme of detailed typification of irrigation waters [4]

Води типу IV [18, с.121] не розглядаються оскільки до нього належать кислі болотні, шахтні і вулканічні води, а також води, сильно забруднені промисловими стоками, які не придатні для зрошення.

За взаємним врівноваженням головних іонів у послідовності, викладеній вище, для підтипів вод можна скласти набори гіпотетичних солей, тобто оцінити кількість токсичних головних іонів у воді (табл. 2).

При випаровуванні усіх підтипів вод є можливість утворення в ґрунті хлориду натрію  $NaCl$  і гідрокарбонату кальцію  $Ca(HCO_3)_2$ , тому при характеристиці іригаційних властивостей вод різних підтипів зупинимося тільки на відмінностях.

Води підтипу I за набором токсичних солей можуть бути самими несприятливими для поливу: крім сульфату натрію ( $Na_2SO_4$ ) вони сприяють утворенню в ґрунті питної соди ( $NaHCO_3$ ), а за наявністю карбонат-іонів ( $CO_3^{2-}$ ) – звичайної соди ( $Na_2CO_3$ ), для рослин ця сіль має найбільшу токсичність з усіх солей, що утворюють головні іони. При накопиченні  $NaHCO_3$  і  $Na_2CO_3$  відбувається осолонцювання ґрунту.

Води підтипів IIa і IIб на відміну від вод підтипу I замість соди ( $Na_2CO_3$  і  $NaHCO_3$ ) сприяють утворенню в ґрунті сульфату магнію ( $MgSO_4$ ),

**Таблиця 2** – Склад гіпотетичних солей в воді при різному співвідношенні головних іонів (послідовність врівноваження іонів взято з Довідникового керівництва гідрогеолога [17, с. 67]) (за авторами статті)

**Table 2** - The composition of hypothetical salts in water at different ratios of major ions (the sequence of ion equilibration is taken from the Handbook of hydrogeologists [17, p. 67]) (according to the authors)

1) Концентрація солей, токсичних для рослин, мг/дм<sup>3</sup>:  $NaCl = 58,4 \times rCl^-$ ;  $Na_2SO_4 = 71,0 \times rSO_4^{2-}$ ;  $NaHCO_3 = 84,0 \times (rHCO_3^- - rCa^{2+} - rMg^{2+})$ .

Іон	$rNa^+$	$rMg^{2+}$	$rCa^{2+}$	Співвідношення іонів (I)
$rCl^-$	$rCl^-$	0	0	$rCl^- + rSO_4^{2-} < rNa^+$ (или $rHCO_3^- > rCa^{2+} + rMg^{2+}$ )
$rSO_4^{2-}$	$rSO_4^{2-}$	0	0	
$rHCO_3^-$	$rHCO_3^- - rCa^{2+} - rMg^{2+}$	$rMg^{2+}$	$rCa^{2+}$	

2) —“—:  $NaCl = 58,4 \times rCl^-$ ;  $Na_2SO_4 = 71,0 \times (rNa^+ - rCl^-)$ ;  $MgSO_4 = 60,2 \times (rCl^- + rSO_4^{2-} - rNa^+)$ .

Іон	$rNa^+$	$rMg^{2+}$	$rCa^{2+}$	Співвідношення іонів (IIa)
$rCl^-$	$rCl^-$	0	0	$rCl^- < rNa^+$ $rCl^- + rSO_4^{2-} \geq rNa^+$ $rHCO_3^- \geq rCa^{2+}$
$rSO_4^{2-}$	$rNa^+ - rCl^-$	$rCl^- + rSO_4^{2-} - rNa^+$	0	
$rHCO_3^-$	0	$rHCO_3^- - rCa^{2+}$	$rCa^{2+}$	

3) —“—:  $NaCl = 58,4 \times rCl^-$ ;  $Na_2SO_4 = 71,0 \times (rNa^+ - rCl^-)$ ;  $MgSO_4 = 60,2 \times rMg^{2+}$ .

Іон	$rNa^+$	$rMg^{2+}$	$rCa^{2+}$	Співвідношення іонів (IIб)
$rCl^-$	$rCl^-$	0	0	$rCl^- < rNa^+$ $rCl^- + rSO_4^{2-} \geq rNa^+$ $rHCO_3^- < rCa^{2+}$
$rSO_4^{2-}$	$rNa^+ - rCl^-$	$rMg^{2+}$	$rCa^{2+} - rHCO_3^-$	
$rHCO_3^-$	0	0	$rHCO_3^-$	

4) —“—:  $NaCl = 58,4 \times rNa^+$ ;  $MgCl_2 = 47,6 \times (rCl^- - rNa^+)$ ;  $MgSO_4 = 60,2 \times rSO_4^{2-}$ .

Іон	$rNa^+$	$rMg^{2+}$	$rCa^{2+}$	Співвідношення іонів (IIIa)
$rCl^-$	$rNa^+$	$rCl^- - rNa^+$	0	$rCl^- \geq rNa^+$ $rCl^- < rNa^+ + rMg^{2+}$ $rHCO_3^- \geq rCa^{2+}$
$rSO_4^{2-}$	0	$rSO_4^{2-}$	0	
$rHCO_3^-$	0	$rHCO_3^- - rCa^{2+}$	$rCa^{2+}$	

5) —“—:  $NaCl = 58,4 \times rNa^+$ ;  $MgCl_2 = 47,6 \times (rCl^- - rNa^+)$ ;  $MgSO_4 = 60,2 \times (rNa^+ + rMg^{2+} - rCl^-)$ .

Іон	$rNa^+$	$rMg^{2+}$	$rCa^{2+}$	Співвідношення іонів (IIIб)
$rCl^-$	$rNa^+$	$rCl^- - rNa^+$	0	$rCl^- \geq rNa^+$ $rCl^- < rNa^+ + rMg^{2+}$ $rHCO_3^- < rCa^{2+}$
$rSO_4^{2-}$	0	$rNa^+ + rMg^{2+} - rCl^-$	$rCa^{2+} - rHCO_3^-$	
$rHCO_3^-$	0	0	$rHCO_3^-$	

6) —“—:  $NaCl = 58,4 \times rNa^+$ ;  $MgCl_2 = 47,6 \times rMg^{2+}$ ;  $CaCl_2 = 55,5 \times (rCl^- - rNa^+ - rMg^{2+})$ .

Іон	$rNa^+$	$rMg^{2+}$	$rCa^{2+}$	Співвідношення іонів (IIIв)
$rCl^-$	$rNa^+$	$rMg^{2+}$	$rCl^- - rNa^+ - rMg^{2+}$	$rCl^- \geq rNa^+ + rMg^{2+}$ (або $rHCO_3^- + rSO_4^{2-} < rCa^{2+}$ )
$rSO_4^{2-}$	0	0	$rSO_4^{2-}$	
$rHCO_3^-$	0	0	$rHCO_3^-$	

**Примітки:** 1. В таблиці 2 сірим виділено область токсичних солей (іонів). 2. В осередку таблиці на перетині стовпця і рядка стоїть кількість (мг-екв./дм<sup>3</sup>) іонів у воді, що входять до складу гіпотетичної солі (які врівноважують один одного та складають гіпотетичну сіль). 3. В таблиці приведені формули розрахунку концентрації гіпотетичних солей в ваговій формі.

який має найменшу токсичність серед усіх солей.

У вод згаданих підтипів (IIa і IIб) набір токсичних солей однаковий, але вони відрізняються вмістом нетоксичних солей, які мають різні іригаційні властивості

Води підтипу IIa сприяють утворенню гідрокарбонату магнію ( $Mg(HCO_3)_2$ ). Він нетоксичний для рослин (за Ковдою В. А.), але здатний викликати осолонцювання ґрунтів. Зайдельман Ф. Р. відносить іон магнію завжди до токсичних іонів [15, с.24].

У водах підтипу IIб замість гідрокарбонату магнію міститься інша нетоксична сіль – гіпс

( $CaSO_4 \times 2H_2O$ ), який добавляють у воду при поливі солонцюватих ґрунтів.

З вод підтипів IIIa і IIIб на відміну від вод підтипів IIa і IIб замість сульфату натрію ( $Na_2SO_4$ ) в ґрунт може надійти менш токсичний хлорид магнію ( $MgCl_2$ ). Ці води за набором солей більш сприятливі для поливу.

Підтипи вод IIIa і IIIб відрізняються один від одного так само, як і підтипи вод IIa і IIб: IIIa – містить гідрокарбонат магнію ( $Mg(HCO_3)_2$ ), а IIIб – сульфат кальцію ( $CaSO_4$ ).

На відміну від IIIa і IIIб в водах підтипу IIIв замість сульфату магнію ( $MgSO_4$ ) з'являється більш токсична для рослин сіль – хлорид каль-

цію ( $CaCl_2$ ). В водах підтипу Шв склад токсичних солей за ступенем несприятливості для поливу можна розташувати на другому місці після складу солей в водах I-го типу.

Для перерахунку концентрації іонів з еквівалентної форми (мг-екв/дм<sup>3</sup>) в вагову (мг/дм<sup>3</sup>) необхідно їх еквівалентну концентрацію помножити на відповідні коефіцієнти, які мають наступні значення:  $CO_3^{2-}$  – 30,00;  $HCO_3^-$  – 61,02;  $SO_4^{2-}$  – 48,03;  $Cl^-$  – 35,45;  $Ca^{2+}$  – 20,04;  $Mg^{2+}$  – 12,15;  $Na^+$  – 22,99;  $K^+$  – 39,10.

Розрахунок концентрації солі за таблицею 2 розглянемо на прикладі вод підтипу I (табл. 2(1)). Питна сода  $NaHCO_3$  гіпотетично присутня в воді за рахунок взаємного врівноваження частини іонів  $Na^+$  і частини іонів  $HCO_3^-$ . В еквівалентах ці частини дорівнюють ( $rHCO_3^- - rCa^{2+} - rMg^{2+}$ ). Вагова концентрація згаданої частини іонів натрію дорівнює  $22,99 \cdot (rHCO_3^- - rCa^{2+} - rMg^{2+})$ , а частина гідрокарбонат-іонів –  $61,02 \cdot (rHCO_3^- - rCa^{2+} - rMg^{2+})$ , звідси концентрація питної соди  $NaHCO_3$  складає  $84,0 \cdot (rHCO_3^- - rCa^{2+} - rMg^{2+})$ .

Посохов О. В., розглядаючи типізацію природних вод Альокіна О. А., запропонував розділити води типу III на два підтипи: IIIа ( $rNa^+ + rMg^{2+} > rCl^-$ ) і IIIб ( $rNa^+ + rMg^{2+} < rCl^-$ ) [18, с.121]. Альокін О.А. зазначає, що підтип IIIб характерний для сильно мінералізованих вод лагунного походження.

Підтип IIIб по Посохову О.В. відповідає підтипу Шв в запропонованій детальній типізації. Природні води цього підтипу можна виключити зі списку придатних для іригації вод. Але, при штучному підживленні водойми іноді можуть утворюватись води придатні для зрошення з співвідношенням іонів за підтипом Шв. Наприклад, у водосховищі Сасик води цього підтипу спостерігалися з ймовірністю 5% і мали найменшу мінералізацію з усього ряду спостережень (менш 1 г/дм<sup>3</sup>) [4].

**Співвідношення іонів.** Найбільш поширеною є класифікація іригаційних властивостей вод за співвідношенням катионів.

Бездніна С.Я. [19] у своїй класифікації поряд з мінералізацією вод враховує співвідношення іонів натрію і суми катионів (рис. 2).

Її класи (категорії) мають такі характеристики:

I – води цілком придатні для зрошення всіх типів ґрунтів;

II – води придатні для зрошення більшості типів ґрунтів;

III – води обмежено придатні (III<sub>1-5</sub> – потребують покращання розбавленням, III<sub>6-7</sub> – потре-

бують хімічної меліорації, III<sub>8-12</sub> – потребують розбавлення та хімічної меліорації);

IV – води умовно придатні (IV<sub>1</sub> – потребують хімічної меліорації, IV<sub>2-4</sub> – потребують розбавлення та хімічної меліорації);

V – води не придатні для зрошення.

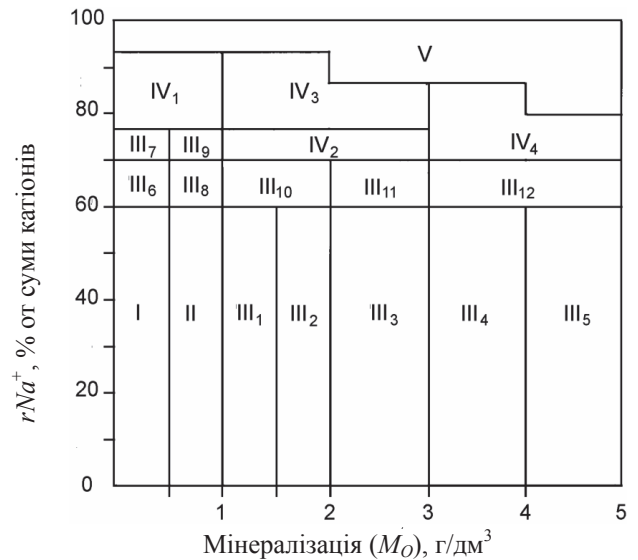


Рис. 2 – Класифікація мінералізованих вод за ступенем їх придатності для зрошення (Бездніна С.Я.)

Fig. 2 - Classification of mineralized waters according to the degree of their suitability for irrigation (Bezdina S.Ya.)

Іригаційний (лужний) коефіцієнт Стеблера розраховується в залежності від типу вод (за Альокінін О.А.) за наступними формулами [10, с.10; 18, с.288]:

при  $rCl^- > rNa^+$  (III)

$$K_a = 288 / (5rCl^-), \quad (1)$$

при  $rCl^- + rSO_4^{2-} > rNa^+ > rCl^-$  (II)

$$K_a = 288 / (rNa^+ + 4rCl^-), \quad (2)$$

при  $rNa^+ > rCl^- + rSO_4^{2-}$  (I)

$$K_a = 288 / (10rNa^+ - 5rCl^- - 9rSO_4^{2-}). \quad (3)$$

Придатність води для зрошення за  $K_a$  оцінюється таким чином [10]:

-  $K_a \geq 18$  – «добра», необмежено придатна для зрошення всіх культур;

-  $18 > K_a \geq 6$  – «задовільна», придатна для зрошення більшості культур у залежності від ґрунтово-кліматичних умов;

-  $6 > K_a \geq 1,2$  – «незадовільна», обмежено придатна для зрошення солестійких культур за умови доброго штучного дренажу, проведення промивних поливів і меліоративних заходів (наприклад, внесення емульсії гіпсу у воду);

-  $K_a < 1,2$  – «погана», непридатна для зрошення.

І. М. Антипов-Каратаєв і Г. М. Кадер вважають [10, с.16; 12, с.50; 13, с.85; 14, с.16], що вода придатна для зрошення при

$$K = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) / Na^+ \geq 0,23M_o, \quad (4)$$

де:  $M_o$  – загальна концентрація розчинних солей у воді, г/дм<sup>3</sup>;

$Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  – концентрація катіонів в ммоль/дм<sup>3</sup>.

М. Ф. Буданов запропонував наступні співвідношення для безпечного поливу водами з мінералізацією  $\leq 1$  г/дм<sup>3</sup>:

$$K_1 = rNa^+ / rCa^{2+} \leq 1,0;$$

$$K_2 = rNa^+ / (rCa^{2+} + rMg^{2+}) \leq 0,70.$$

Для вод з мінералізацією 1-3 г/дм<sup>3</sup> при збереженні вище зазначених умов, вводиться ще одна умова

$$K_3 = r\Sigma\hat{e} / (rCa^{2+} + rMg^{2+}) \leq B,$$

де ( $r\Sigma\hat{e}$ ) – сума головних іонів.

Коефіцієнт  $K_3$  не повинен перевищувати: 4 – для середньо- і важкосуглинистих ґрунтів; 5 – для легкосуглинистих ґрунтів; 6 – для супіщаних і піщаних ґрунтів:

Можейко А. М. і Ворітник Т. К. вважають, що води придатні для поливу, за умови

$$K = (Na^+ + K^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+) \leq 0,65,$$

де  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  і  $Mg^{2+}$  – концентрація катіонів в ммоль/дм<sup>3</sup>.

При  $K \leq 0,65$  вода сприятлива для поливу,  $0,65 < K \leq 0,75$  – несприятлива,  $K > 0,75$  – дуже несприятлива, оскільки викликає осолонцювання ґрунту.

Саболч І. та Дораб К. вказують, що кількість іонів  $rMg^{2+}$  у поливній воді не впливає шкідливо на ґрунт, якщо [13, с.85; 14, с.16; 20, с.18]

$$rMg^{2+} / (rCa^{2+} + rMg^{2+}) \leq 0,50.$$

Келлі і Лібіх в свою чергу встановили, що наявність  $Na^+$  і  $Mg^{2+}$  в поливній воді не впливає погано на ґрунт, при умові:

$$rNa^+ / (rCa^{2+} + rMg^{2+}) \leq 1,0;$$

$$rMg^{2+} / (rCa^{2+} + rMg^{2+}) \leq 0,60.$$

Показник  $SAR$  розраховується за формулою (використовується для оцінки якості іригаційних вод в США) [14, с. 16]:

$$SAR = rNa^+ / [(rCa^{2+} + rMg^{2+}) / 2]^{0,5}, \quad (5)$$

де  $rNa^+$ ,  $rCa^{2+}$ ,  $rMg^{2+}$  – концентрація катіонів солей, мг-екв/дм<sup>3</sup>.

За значенням  $SAR$  дається оцінка небезпеки осолонцювання ґрунтів:  $SAR \leq 10$  – мала;  $10 < SAR \leq 18$  – середня;  $18 < SAR \leq 26$  – висока;  $SAR > 26$  – дуже висока.

### 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Для оцінки якості вод Кучурганського і Барабойського водосховищ використані результати спостережень Одеського обласного управління водних ресурсів за період 2007-2017 рр.

#### Кучурганське водосховище (с. Градениці).

Мінералізація вод (рис. 3а) в теплий період (ТП) в середньому складає 1,7 г/дм<sup>3</sup> при діапазоні від 0,85 до 3,4 г/дм<sup>3</sup>. З ймовірністю 90% протягом ТП мінералізація вод знаходиться в діапазоні 1-3 г/дм<sup>3</sup>. За класифікацією Костякова А. М. води з мінералізацією цього діапазону відносяться до вод з «підвищеною небезпечністю» засолення (категорія 3). Для них за рекомендацією Костякова А. М. [11, с.48, 49] необхідний аналіз сольового складу.

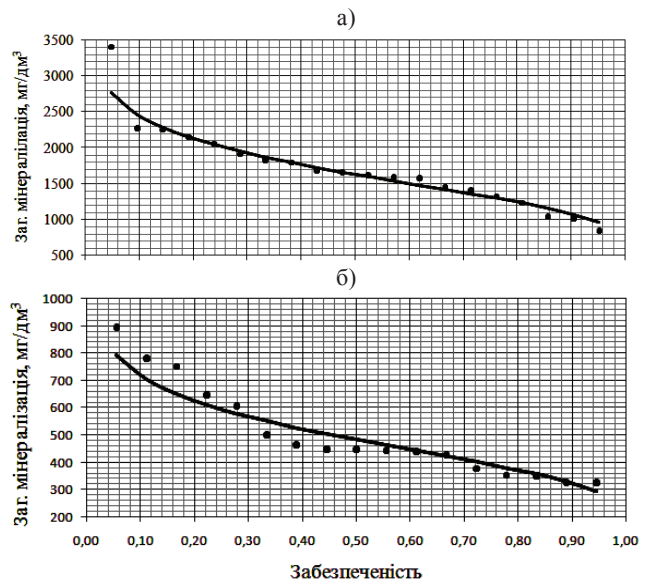


Рис. 3 – Статистичний розподіл мінералізації вод Кучурганського (а) і Барабойського (б) водосховищ: маркер коло – емпіричний розподіл; суцільна лінія - логнормальний закон (з параметрами: Кучурганське -  $\check{C} = 7,396$  і  $\check{G} = 0,3187$ ; Барабойське -  $\check{C} = 6,180$  і  $\check{G} = 0,3109$ ; де  $\check{C}$  і  $\check{G}$  – середнє і середньоквадратичне відхилення логарифмованих рядів спостережень)

Fig. 3 - Statistical distribution of mineralization of waters of Kuchurgan (a) and Baraboysky (b) reservoirs: marker circle - empirical distribution; solid line - lognormal law (with parameters: Kuchurgan -  $\check{C} = 7,396$  and  $\check{G} = 0,3187$ ; Baraboyske -  $\check{C} = 6,180$  and  $\check{G} = 0,3109$ ; where  $\check{C}$  and  $\check{G}$  - standard and standard deviation of logarithmic series of observations)



Такі води непридатні для зрошення усіх типів ґрунтів (у звичайних умовах). Полив можливий тільки при добрій проникності ґрунтів і наявності дренажу.

За класифікацією Альокіна О. А. [18, с.120] води відносяться до сульфатного класу, групи натрію протягом 85-90% ТП.

В середньому води відносяться до підтипу Пб, але умови формування їх якості такі, що протягом ТП вони можуть бути наступних підтипів: Па (5%), Пб (80%) і Пшб (15%). У цілому протягом року розподіл підтипів вод у Кучурганському водосховищі буде: Па (3%), Пб (84%) і Пшб (13%). Тобто, і протягом року і у теплий період ймовірність появи різних підтипів вод у Кучурганському водосховищі в районі с. Градениці приблизно однакова.

Загальна концентрація токсичних солей в водах Кучурганського водосховища в середньому складає 1,3 г/дм<sup>3</sup> (з діапазоном – 0,53÷2,4 г/дм<sup>3</sup>).

Надлишковий полив може сприяти потраплянню в ґрунт: *NaCl* в середній кількості 0,55 г/дм<sup>3</sup> (до 0,92 г/дм<sup>3</sup>). За ступенем токсичності (по Ковді В. А.) ця сіль розташована одразу за питною содою *NaHCO<sub>3</sub>*. Крім того, протягом ТП можуть ще утворитися менш токсичні солі: *Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>* у середній кількості 0,20 г/дм<sup>3</sup> (до 0,79 г/дм<sup>3</sup>) з ймовірністю 85% і *MgSO<sub>4</sub>* – 0,52 г/дм<sup>3</sup> (до 1,5 г/дм<sup>3</sup>) з ймовірністю 100%.

Сумарний вміст хлориду і сульфату натрію при максимальних значеннях їх концентрації не перевищує допустимої норми (по аналогії з врахуванням ефекту спільної дії – 0,92/2 + 0,79/5 = 0,62 < 1,0) для поливу легких, добре проникних і дренованих ґрунтів.

Випаровування шару води 10 мм на площі 1 га може привести до утворення в середньому 125 кг/га (до 240 кг/га) токсичних солей, з яких: 55 кг/га (до 92 кг/га) буде *NaCl*; 20 кг/га (до 79 кг/га) – *Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>*; 52 кг/га (до 150 кг/га) – *MgSO<sub>4</sub>*.

За класифікацією Бездніної С.Я. води водосховища відносяться до категорії III(1-5). Такі води можуть використовуватися для поливу після їх розбавлення водою з малою мінералізацією.

#### Небезпека осолонцювання:

за методикою Стеблера Х. протягом 45% ТП води незадовільні, обмежено придатні для зрошення солестійких культур, а протягом 55% ТП – «задовільні», придатні для зрошення більшості культур в залежності від ґрунтово-кліматичних умов;

за Антиповим-Каратаєвим І. Н. і Каде-ром Г. М. – води «придатні» для поливу 85% ТП, і тільки 15% ТП вони «непридатні» для поливу;

за Будановим А.М. – води «непридатні» для поливу 95% ТП;

за Можейко А.М. і Воротником Т.К. – води «сприятливі» для поливу 85% ТП, «несприятливі» 5% ТП і «дуже несприятливі» 10% ТП;

за показником *SAR* департаменту сільського господарства США – небезпека осолонцювання «низька» 100% ТП;

кількість магнію у воді Кучурганського водосховища за Сабольчем І. і Дарабом К. шкідливо впливає на ґрунти (небезпека магнієвого осолонцювання) протягом 75% ТП;

за Келлі і Лібіхом – 70% ТП.

#### Барабойське водосховище.

В теплий період (ТП) загальна мінералізація вод (рис. 3б) в середньому складає 0,51 г/дм<sup>3</sup> при діапазоні від 0,33 до 0,90 г/дм<sup>3</sup>.

За класифікацією Альокіна О.А. [18, с. 120] води відносяться до сульфатного класу протягом 71% ТП і до карбонатного – 29% ТП, групи магнію (47% ТП) або кальцію (47% ТП).

В середньому води відносяться до підтипу Па, але протягом ТП вони можуть бути наступних підтипів: Па (53%), Пб (41%) і Пшб (6%). У цілому протягом року розподіл підтипів вод у водосховищі буде: Па (40%), Пб (52%) і Пшб (8%). Тобто, протягом холодного періоду частіше проявляються води підтипу Пб у порівнянні з водами підтипу Па. Але обидва підтипу є переважаючими.

Загальна концентрація токсичних іонів в водах протягом ТП в середньому складає 0,29 г/дм<sup>3</sup> (при діапазоні – 0,14÷0,52 г/дм<sup>3</sup>).

Кількість гіпотетичних солей в водах дорівнює: *NaCl* в середньому 0,086 г/дм<sup>3</sup> (до 0,18 г/дм<sup>3</sup>). Крім того, протягом ТП можуть ще утворитися менш токсичні солі: *Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>* у середній кількості 0,045 г/дм<sup>3</sup> (до 0,13 г/дм<sup>3</sup>) з ймовірністю 94% і *MgSO<sub>4</sub>* – 0,16 г/дм<sup>3</sup> (до 0,38 г/дм<sup>3</sup>) з ймовірністю 100%.

Випаровування шару води 10 мм на площі 1 га може привести до утворення в середньому 29 кг/га (до 52 кг/га) токсичних солей, з яких: 8,6 кг/га (до 18 кг/га) буде *NaCl*; 4,5 кг/га (до 13 кг/га) – *Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>*; 16 кг/га (до 38 кг/га) – *MgSO<sub>4</sub>*.

Води водосховища за класифікацією Костякова А. М. з ймовірністю 71% протягом ТП відносяться до 2 класу – «обережний підхід» при поливі, 29% ТП до 1 класу – «добра»; за класифікацією США (35%) – з «високою» солоністю і 65% ТП з «середньою» солоністю. При використанні для поливу вод Барабойського водосховища є ризик засолення ґрунту.

За класифікацією Бездніної С. Я. води відносяться до категорії I (води цілком придатні для

зрошення всіх типів ґрунтів) з ймовірністю 65% протягом ТП і до категорії II (води придатні для зрошення більшості типів ґрунтів) – 35%.

*Небезпека осолонцювання:*

за методикою Стеблера Х. протягом усього ТП води добрі, необмежено придатна для зрошення всіх культур;

за Антиповим-Каратаєвим І. Н. і Кадером Г. М. – води «придатні» для поливу 100% ТП;

за Будановим А. М. – води «придатні» для поливу 82% ТП і «непридатні» – 18% ТП;

за Можейко А. М. і Воротником Т. К. – води «сприятливі» для поливу 100% ТП;

за показником SAR департаменту сільського господарства США – небезпека осолонцювання «низька» 100% ТП;

кількість магнію у воді Барабойського водосховища за Сабольчем І. і Дарабом К. шкідливо впливає на ґрунти (небезпека магнієвого осолонцювання) протягом 53% ТП і «не шкідливе» 47% ТП;

за Келлі і Лібіхом – 71% ТП осолонцювання «неможливе» і 29% – «можливе».

Зіставлення характеристик водосховищ показує, що води Кучурганського водосховища за мінералізацією непридатні для поливу середньо-суглинкових, важкосуглинкових та глинистих ґрунтів. Вони будуть сприяти засоленню цих ґрунтів протягом практично усього (90%) теплового періоду. Підлучення ґрунту при поливі можливе у 70-95% теплового періоду. За вмістом токсичних солей зрошення можливе тільки легких, добрепроникних ґрунтів.

Води Барабойського водосховища за мінералізацією і співвідношенням головних іонів мають більш сприятливі іригаційні властивості: вони придатні для зрошення більшості типів ґрунтів, здатні утворювати в ґрунті меншу кількість токсичних солей та сприяють магнієвому осолонцюванню протягом 29-53% теплового періоду.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Води Кучурганського водосховища мають високу солоність, їх використання для поливу в звичайних умовах сприяє засоленню ґрунту протягом 90% ТП.

2. Вміст магнію створює небезпеку осолонцювання ґрунту протягом 70-95% ТП.

3. Використання вод Кучурганського водосховища для поливу можливе на легкопроникних (піщаних і супіщаних) ґрунтах при наявності дренажу.

4. Безпечне використання вод Кучурганського водосховища для поливу суглинстих ґрунтів можливе при розбавленні їх водою з малою мінералізацією.

5. Води Барабойського водосховища мають низьку солоність, але вони потребують обережного підходу при поливі.

6. Вміст магнію створює небезпеку осолонцювання ґрунту з ймовірністю 29-53%.

7. Використання вод Барабойського водосховища для поливу можливе для зрошення більшості типів ґрунтів.

8. Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення методики розрахунку гіпотетичних токсичних солей у водах та аналізу іригаційних властивостей вод інших водних об'єктів Одеської області.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. На півдні України може запрацювати пілотний проект з іригації землі.  
URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-irygacija-pivden-ukrajiny/31165680.html> (дата звернення 10.05.2021).
2. Кулибабин А. Г., Незвинский А. Ф., Кичук И. Д. Эколого-экономические аспекты орошения и рационального природопользования в зоне Дунай-Днестровской оросительной системы Одесской области / УЭАН Украины, Черноморское отделение. Одесса, 1997. 85 с.
3. Студьонова К. С., Юрасов С. М. Зіставлення іригаційних властивостей вод річок Дунай і Дністер. *Матеріали XIX наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ*, 25-29 травня 2020. Одеса: ОДЕКУ, 2020. С. 149.
4. Юрасов С. М., Кузьмина В. А. Иригаційна оцінка якості вод Сасику. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 224. С. 112-121.
5. Sidorencu F., Gutsul T., Bogdevic O. et al. Long-term environmental risks of pollution of the Dniester river basin by obsolete pesticides. *Proceedings of the International Conference „EU Integration and Management of the Dniester River Basin”, Chisinau, October 8-9, 2020*. Chisinau: Eco-TIRAS, 2020. Pp. 282-285.
6. Яров Я. С. Гідрохімічний режим та екологічний стан річки Барабой. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2010. № 7. С. 200-210.
7. Яров Я. С. Оцінка якості води річки Барабой за гідрохімічними показниками. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2012. Вип. 13. С. 177-186.
8. Ковалёва Н. В., Мединец И. В., Мединец С. В. Трофический статус вод Кучурганского лимана. *Интегрированное управление трансграничным бассейном Днестра: платформа для сотрудничества и современные вызовы: материалы международной конференции*. Тирасполь, 26-27 октября 2017 года. Тирасполь: Eco-TIRAS, 2017. С. 183-186.
9. Гидрохимические особенности двух контрастных (Дубоссарского и Кучурганского) водохранилищ / Касапова Л. В., Филипенко С. И., Руденко А. К., Калатинская М. А. *Интегрированное управление*

трансграничным бассейном Днестра: платформа для сотрудничества и современные вызовы: материалы международной конференции. Тирасполь, 26-27 октября 2017 года. Тирасполь: Есо-TIRAS, 2017. С. 164-166.

10. Слюсарев В. Н., Терпелец В. И., Швец Т. В. Методические указания по проведению практических занятий по дисциплине «Мелиоративное почвоведение». Краснодар : КубГАУ, 2014. 26 с.
11. Костяков А. Н. Основы мелиораций. Москва : Государственное из-во сельскохозяйственной литературы, 1960. 620 с.
12. Заносова В. И., Молчанова Т. Я. Оценка качества подземных вод и степени их пригодности для орошения. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2017. № 6 (152). С. 49-53.
13. Зайдельман Ф. Р. Мелиорация почв: ученик. 3-е изд., испр. и доп. Москва : Изд-во МГУ им. М.В.Ломоносова, 2003. 448 с.
14. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
15. Практикум по курсу «Мелиорация почв» / Зайдельман Ф. Р., Смирнова Л. Ф., Шваров А. П., Никифорова А. С. Москва : изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007. 66 с.
16. Астапов С. В. Мелиоративное почвоведение (практикум). 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Гос. издат. сельхоз. лит., 1958. 368 с.
17. Справочное руководство гидрогеолога. 3-е изд. перераб. и доп. Том.1 / под ред. проф. В.М. Максимова. Ленинград : Недра, 1979. 512 с.
18. Алёкин О. А. Основы гидрохимии. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 446 с.
19. Безднина С. Я. Научные основы оценки качества воды для орошения. Рязань: Изд. РГТУ, 2013. 171 с.
20. Атдаев С., Акмамедов Б. Качество воды главного коллектора туркменского озера «Алтын Асыр». *Международный научно-практический журнал*. 2012. № 3-4. С. 18-19.

## REFERENCES

1. *Na pivdni Ukrainy mozhe zapratsiuvaty pilotnyi projekt z iryhatsii zemli [A pilot project on land irrigation may start operating in the south of Ukraine]*. Available at: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-irygacija-pivden-ukrajiny/31165680.html> (Accessed: 10.05.2021). (in Ukr.)
2. Kulibabin, A.G., Nezvinskii, A.F. & Kichuk, I.D. (1997). *Ekologo-ekonomicheskiye aspekty orosheniya i ratsional'nogo prirodopol'zovaniya v zone Dunay-Dnestrovskoy orositel'noy sistemy Odesskoy oblasti [Ecological and economic aspects of irrigation and environmental management in the area of the Danube-Dniester irrigation system of the Odessa Region]*. Black Sea branch of Ukrainian Environmental Academy of Sciences. Odessa. (in Russ.)
3. Studonova, K.S. & Yurasov, S.M. (2020). [Comparison of irrigation properties of the Danube and Dniester rivers]. *Materialy XIX naukovoi konferentsii molodykh vchenykh ODEKU [Proceedings of the XIX scientific conference of young scientists of Odessa State Environmental University]*, 25-29 May. Odesa, p. 149. (in Ukr.)
4. Yurasov, S.M. & Kuzmyna, V.A. (2019). [Irrigative assessment of water quality of Sasyk]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 224, pp. 112-121. (in Ukr.)
5. Sidorencu, F., Gutsul, T., Bogdevic, O. et al. (2020). Long-

- term environmental risks of pollution of the Dniester river basin by obsolete pesticides. *Proceedings of the International Conference „EU Integration and Management of the Dniester River Basin”*, Chisinau, October 8-9, 2020. Chisinau: Eco-TIRAS. pp. 282-285.
6. Yarov, Ya.S. (2010). *Hidrokhimichniy rezhym ta ekolohichniy stan richky Baraboi [Hydrochemical regime and ecological condition of the Baraboy river]*. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 7, pp. 200-210. (in Ukr.)
7. Yarov, Ya.S. (2012). *Otsinka yakosti vody richky Baraboi za hidrokhimichnymi pokaznykamy. Visnik Odes'kogo derzavnogo ekolohichnogo universitetu [Bulletin of Odessa state environmental university]*, 13, pp. 177-186. (in Ukr.)
8. Kovalyova, N.V., Medinets, I.V. & Medinets, S.V. (2017). *Troficheskyy status vod Kuchurganskogo limana [Trophic status of the waters of the Kuchurgan estuary]*. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Integrirovannoe upravlenie transgranichnym baseynom Dnestra: platforma dlya sotrudnichestva i sovremennyye vyzovy. Tiraspol', 26-27 oktyabrya 2017 goda. [Materials of the international conference “Integrated management of the Dniester transboundary basin: a platform for cooperation and modern challenges. Tiraspol, October 26-27, 2017]*. pp. 183-186. (in Russ.)
9. Kasapova L.V. et al. (2017). *Gidrokhimicheskie osobennosti dvukh kantrastnykh (Dubossarskogo i Kuchurganskogo vodokhranilishch [Hydrochemical features of two contrasting (Dubossary and Kuchurgan) reservoirs]*. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Integrirovannoe upravlenie transgranichnym baseynom Dnestra : platforma dlya sotrudnichestva i sovremennyye vyzovy. Tiraspol', 26-27 oktyabrya 2017 goda [Materials of the international conference “Integrated management of the Dniester transboundary basin: a platform for cooperation and modern challenges. Tiraspol, October 26-27, 2017]*, pp. 164-166. (in Russ.)
10. Slyusarev, V.N., Terpelets, V.I. & Shvets, T.V. (2014). *Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu prakticheskikh zanyatiy po distsipline «Meliorativnoye pochvovedeniye» [Guidelines for conducting practical classes on the subject “Land-reclamation soil science”]*. Krasnodar: KubSAU. (in Russ.)
11. Kostyakov, A.N. (1960). *Osnovy melioratsii [Basics of land reclamation]*. Moscow: State of Agricultural Literature. (in Russ.)
12. Zanosova, V.I. & Molchanova, T.Ya. (2017). *Otsenka kachestva podzemnykh vod i stepeni ikh prigodnosti dlya orosheniya [Assessment of groundwater quality and degree of their suitability for irrigation]*. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Altai State Agrarian University]*, № 6 (152), pp. 49-53. (in Russ.)
13. Zaydelman, F.R. (2003). *Melioratsiya pochv [Soil Reclamation]*. 3rd ed. corrected and add. Moscow: Publishing House of the M.V. Lomonosov Moscow State University. (in Russ.)
14. Arinushkina, E.V. (1970). *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv [Manual on chemical analysis of soil]*. 2nd ed. revised and enlarged. Moscow : Publishing House of Moscow State University. (in Russ.)
15. Zaydelman, F.R. et al. (2007). *Praktikum po kursu «Melioratsiya pochv» [Workshop on the course “Soil melioration”]*. Moscow: Publishing House of the M.V. Lomonosov Moscow State University. (in Russ.)
16. Astapov, S.V. (1958). *Meliorativnoye pochvovedenie (praktikum) [Meliorative soil science (practical)]*.

- 2d ed., revised and updated. Moscow: Agricultural literature State publ. (in Russ.)
17. Maksimov, V.M. (ed). (1979). *Spravochnoe rukovodstvo gidrogeologa [Reference guide hydrogeologist]*. 3rd ed. reclaiming and add. Vol. 1. Leningrad: Nedra. (in Russ.)
18. Alekin, O.A. (1970). *Osnovy gidrokhimii [Basics of hydrochemistry]*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ.)
19. Bezdina, S.Y. (2013). *Nauchnye osnovy otsenki kachestva vody dlya orosheniya [Scientific basis for assessing the quality of irrigation water]*. Ryazan: The P.A.Kostychev RSATU Publ. (in Russ.)
20. Atdaev, S. & Akmamedov, B. (2012). Kachestvo vody glavnogo kollektora turkmenskogo ozera «Altyn Asyr» [Water quality of the main collector of the Turkmen lake «Altyn Asyr»]. *International scientific and practical journal*, 3-4, pp. 18-19. (in Russ.)

## IRRIGATION PROPERTIES OF KUCHURGAN AND BARABOI WATER RESERVOIRS

**S. M. Yurasov, V. D. Karaulov, M. H. Perchenko,  
E. O. Yudyna, N. V. Hrabko**

*Odessa State Environmental University,  
Lvivska st., 15, 65016, Odesa, Ukraine, urasen54@gmail.com*

The problem of irrigation of agricultural lands in the southern part of Ukraine, including Odesa Region, has been and still remains extremely important. The limited amount of water resources of irrigation quality forces the nation to create artificial reservoirs for water accumulation with the purpose of their further use for irrigation. Sources of reservoirs recharge in the southern part of Odesa Region usually include the Danube and the Dniester whose waters meet irrigation conditions. However, mixing the Danube or Dniester water with the water from natural reservoirs, together with the influence of local factors of water quality formation, lead to changes in water masses properties. Sasyk Reservoir is one of the examples: the water from the reservoir, when mixed with the Danube water, may be used for irrigating only light, well-permeable and drained soil, whilst the Danube water is suitable for irrigating all types of soils throughout the warm period of the year.

The article presents an overview of different methods of irrigation water assessment. It offers detailed typification of irrigation waters based on natural waters typification offered by Aliokin O.A., and includes a table for calculating the concentration of toxic hypothetical salt in water samples of different subtypes. The water quality assessment of Kuchurgan and Baraboi Reservoirs was performed according to the studied methods. It is found that the irrigation properties of their water masses significantly differ. Kuchurgan Reservoir: mineralization of water during 90% of the warm period (WP) is in the range of 1-3 g/dm<sup>3</sup>; according to the classification of Kostikov A.M. such water faces "increased danger" of salinization (category 3); the amount of toxic salts does not exceed 2.4 g/dm<sup>3</sup>; water of subtype IIb (84% of the WP); composition of toxic salts is represented by NaCl (max 0.92 g/dm<sup>3</sup>), Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (max 0.79 g/dm<sup>3</sup>) and MgSO<sub>4</sub> (max 1.5 g/dm<sup>3</sup>); the total content of chloride and sodium sulfate in the water does not exceed the standard value for watering light, well-permeable and drained soils; the magnesium content promotes salinization during 70-75% of the WP. Baraboi Reservoir: water salinity does not exceed 1 g/dm<sup>3</sup>; according to Kostikov A.M. watering requires a "careful approach" (category 2) during 71% of the WP, and 29% of water falls into "good" category (category 1); the ratio of major ions refers to subtypes IIa (53%) and IIb (41%); according to Bezdina S.Ya. water belongs to category I (suitable for irrigation of all types of soils) with a probability of 65% during the WP and to category II (suitable for irrigation of most types of soils) – with 35% probability; the amount of magnesium adversely affects the soil during 53% of the WP.

The water masses of Kuchurgan and Baraboi Reservoirs are suitable for irrigation, but require a careful approach due to the possibility of magnesium salinization. The water of Baraboi Reservoir has the best irrigation properties and is suitable for watering most types of soils. The water of Kuchurgan Reservoir may be used only for watering light, well-permeable and drained soils.

**Key words:** irrigative assessment; water quality; Kuchurgan reservoir; Baraboi reservoir; detailed typification of irrigation waters; salinization.

## ИРРИГАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОД КУЧУРГАНСКОГО И БАРАБОЙСЬКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ

С. М. Юрасов, В. Д. Караулов, М. Г. Перченко,  
Э. А. Юдина, Н. В. Грабко

Одесский государственный экологический университет,  
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, [urasen54@gmail.com](mailto:urasen54@gmail.com)

Проблема ирригации сельхозугодий юга Украины, в том числе Одесской области, была и остается очень актуальной. Ограниченность водных ресурсов ирригационного качества заставляет создавать искусственные водоемы для накопления вод с целью их дальнейшего использования для полива. Источниками подпитки водохранилищ на юге Одесской области обычно являются Дунай и Днестр, воды которых соответствуют ирригационным кондициям. Но смешивание дунайских или днестровских вод с водами природных источников питания водохранилищ и влияние местных факторов формирования качества вод приводят к изменению свойств водных масс. Примером может служить водохранилище Сасык, воды которого после смешивания с водами Дуная пригодны для орошения только легких, хорошо проницаемых и дренированных почв. Тогда как дунайские воды подходят для полива всех типов почв в течение всего теплого периода года.

В статье предоставляется обзор различных методик ирригационной оценки вод. Предложена детальная типизация ирригационных вод на основе типизации природных вод Альокина О. А. и таблица расчета концентрации токсичных гипотетических солей в водах различных подтипов. Выполнена оценка качества вод Кучурганского и Барабойского водохранилищ по рассмотренным методикам. Получено, что ирригационные свойства вод этих водохранилищ существенно отличаются друг от друга. Кучурганское водохранилище: минерализация вод в течение 90% теплого периода (ТП) находится в диапазоне 1-3 г/дм<sup>3</sup>; по классификации Костякова А. М. это воды с «повышенной опасностью» засоления (категория 3); количество токсичных солей не превышает 2,4 г/дм<sup>3</sup>; воды подтипа Пб (84% ТП), состав токсичных солей представлен  $NaCl$  (max 0,92 г/дм<sup>3</sup>),  $Na_2SO_4$  (max 0,79 г/ дм<sup>3</sup>) и  $MgSO_4$  (max 1,5 г/дм<sup>3</sup>); суммарное содержание хлорида и сульфата натрия в воде не превышает норму для полива легких, хорошо проницаемых и дренированных почв; содержание магния способствует осолонцеванию в течение 70-75% ТП. Барабойское водохранилище: минерализация вод не превышает 1 г/дм<sup>3</sup>; по Костякову А. М. при поливе нужен «осторожный подход» (2 категория) в течение 71% ТП и в 29% – воды «хорошие» (1 категория); соотношение главных ионов относится к подтипам Па (53%) и Пб (41%); по Бездний С. Я. воды относятся к категории I (воды вполне пригодны для орошения всех типов почв) с вероятностью 65% в течение ТП и к категории II (пригодны для орошения большинства типов почв) – 35%; количество магния вредно влияет на почву в течение 53% ТП.

Воды Кучурганского и Барабойского водохранилищ пригодны для орошения, но требуют осторожного подхода в связи с возможностью магниевое осолонцевания. Воды Барабойское водохранилище имеют лучшие ирригационные свойства, они пригодны для полива большинства типов почв, воды Кучурганского – только для полива легких, хорошо проницаемых и дренированных почв.

**Ключевые слова:** ирригационная оценка; качество вод; Кучурганское водохранилище; Барабойское водохранилище; детальная типизация ирригационных вод; осолонцевание.

Подання до редакції : 17. 05. 2021  
Надходження остаточної версії : 11. 06. 2021  
Публікація статті : 30. 06. 2021