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

Номер 32

Issue 32

2023

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 ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Ukraïns'kij Gìdrometeorologìčnij 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.

№ 32, 2023

Одеса
Одеський державний екологічний університет
2023

Засновник і видавець:
Одеський державний екологічний університет

Founder and Publisher:
Odessa State Environmental University

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 розділу : Екологічні аспекти природокористування

С**. М. Степаненко**, д-р фіз.- мат. наук, проф., ректор 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. Гребінь**, д-р геогр. наук, проф. кафедри гідрології та гідроекології Київського національного університету ім. Тараса Шевченка; **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-Тімор" (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 агроекології ОДЕКУ; **І. Г. Семенова**, д-р геогр. наук, доцент, проф. кафедри військової підготовки ОДЕКУ; **М. М. Федоряк,** д-р біол. наук, проф. та зав. кафедри екології та біомоніторингу Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича; **В. М. Хохлов**, д-р геогр. наук, проф. кафедри метеорології і кліматології ОДЕКУ; **А. В. Чугай,** д-р техн. наук, декан природоохоронного факультету ОДЕКУ; **Ж. Р. Шакірзанова,** д-р геогр. наук, проф., зав. кафедри гідрології суші ОДЕКУ.

Редактор англомовних текстів
А. В. Іванченко, канд. філол. наук, доц. каф. іноземних мов ОДЕКУ.

Відповідальний секретар
О. І. Марунич, співробітник редакційно-видавничого відділу ОДЕКУ.

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

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 Resourses, 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 section : Environmental Aspects of Nature Management

Sergiy M. Stepanenko, D. Sc. in Physics and Mathematics, Prof., Rector of OSENU, Ukraine;
Editor of the sections : Meteorology and Climatology, Agricultural Meteorology

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; **Valeriy M. Khokhlov**, D. Sc. in Geography, Prof. of the Department of Meteorology and Climatology of OSENU, 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 Makarynskyy**, 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; **Inna Semenova**, D. Sc. in Geography, Assoc. Prof., Prof. of the Department of Military Training of OSENU, Ukraine; **Zhanetta R. Shakhirzanova,** D. Sc. in Geography, Prof., Head of the Department of Land Hydrology 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.

"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) 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 103 «Науки про Землю» та 101 «Екологія».

Ukrainian Hydrometeorological Journal publishes the original results of fundamental and applied research in the following fields: 'Hydrometeorology' (Meteorology and Climatology; Agricultural Meteorology; Hydrology, Water Resources, Hydrochemistry; Oceanography) of the specialty 'Earth Sciences' and 'Environmental Aspects of Nature Management' of the specialty 'Environmental Sciences'. 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 'Environmental Sciences'.

UNICHECK

В процесі підготовки номера до друку було використано Систему виявлення збігів / ідентичності / схожості ***UNICHECK*** *для пошуку текстового збігу*

© Одеський державний екологічний університет, 2023

ЗМІСТ

CONTENTS

Метеорологія і кліматологія

Заболотна О. С., Кривошеїн О. О., Кривобок О. А. Валідація опадів отриманих за супутниковими даними GPM та H-SAF з даними наземних метеостанцій в Україні **5**

Семенова І. Г. Класифікація синоптичних процесів на території України з використанням модифікованого методу Дженкінсона-Коллісона **16**

Гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія

Лобода Н. С., Куза А. М. Оцінка екологічних ризиків забруднення біогенними речовинами річки Когильник на основі пробіт-функцій **34**

Лобода Н. С., Розвод М. Р. Закономірності коливань стоку річки Дністер (Україна) в умовах кліматичних змін на початку XXI сторіччя **50**

Океанологія

Ільїн Ю. П. Середній стан та сезонна мінливість структури і динаміки перехідних вод Дніпровсько-Бузької гирлової області **63**

Малюга Е. Є., Гаврилюк Р. В. Міжрічна мінливість льодового покриву в протоці Дейвіса та морі Лабрадор за період з 1979 по 2023 рік **80**

Тучковенко Ю. С., Кушнір Д. В., Овчарук В. А., Соколов А. В., Коморін В. М. Особливості розповсюдження в Чорному морі розпріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману після руйнування греблі Каховського водосховища **95**

Екологічні аспекти природокористування

Шабатура О. В., Тютюнник Ю. Г., Блюм О. Б. Біогеохімічне лихеноіндикаційне дослідження формування та часових змін атмосферного забруднення дендропарку «Олександрія» **115**

Meteorology and Climatology

Zabolotna O. S., Kryvoshein O. O., Kryvobok O. A. Validation of precipitation obtained from GPM and H-SAF satellite data with relation to Ukrainian ground weather stations' data **5**

Semenova I. G. Classification of synoptic processes in the territory of Ukraine using a modified Jenkinson and Collison method **16**

Hydrology and Water Resources, Hydrochemistry

Loboda N. S., Kuza A. M. Environmental risks assessment of the Kogylnyk River nutrient pollution based on probit functions **34**

Loboda N. S., Rozvod M. R. Patterns of runoff fluctuations of the Dniester River (Ukraine) under conditions of climate change at the beginning of the 21st century **50**

Oceanography

Ilyin Yu. P. Average condition and seasonal variability of the structure and dynamics of transitional waters in the Dnieper-Bug estuary region **63**

Maliuha E., Gavriluk R. Interannual variability of ice cover across Davis Strait and the Labrador Sea for the period from 1979 to 2023 **80**

Tuchkovenko Yu. S., Kushnir D. V., Ovcharuk V. A., Sokolov A. V., Komorin V. N. Characteristics of Black Sea dispersion of freshened and polluted transitional waters from the Dnipro-Bug estuary after destruction of the Kakhovka Reservoir dam **95**

Environmental Aspects of Nature Management

Shabatura O. V., Tyutyunnyk Yu. H., Blum O. B. Biogeochemical lichen indication study of formation and temporal changes of Oleksandriia Arboretum atmospheric pollution **115**

Савенець М. В., Надточій Л. М., Козленко Т. В., Комісар К. М., Жемера Н. С. Стан забруднення атмосферного повітря в Україні напередодні повномасштабного російського вторгнення. Частина 2: Загальний вміст забруднюючих речовин за даними супутникових спостережень **130**

Savenets M. V., Nadtochii L. M., Kozlenko T. V., Komisar K. M., Zhemera N. S. Status of atmospheric air pollution in Ukraine prior to the full-scale russian invasion. Part 2: Pollutants total content according to the satellite data

Сафранов Т. А., Приходько В. Ю., Яновський Д. Ю. Ресурсоцінний потенціал потоку твердих побутових відходів Одеської області **144**

Safranov T. A., Prykhodko V. Yu., Yanovsky D. Yu. Resource potential of municipal solid waste in Odesa Region

Ukrainian hydrometeorological journal, 2023, 32, 5-15 doi: 10.31481/uhmj.32.2023.01
ISSN 2311-0902 (print), 2616-7271 (online)

УДК 528.88:551.583

ВАЛІДАЦІЯ ОПАДІВ ОТРИМАНИХ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ GPM ТА H-SAF З ДАНИМИ НАЗЕМНИХ МЕТЕОСТАНЦІЙ УКРАЇНИ

О.С. Заболотна, О. О. Кривошеїн, О. А. Кривобок

Український гідрометеорологічний інститут,
03028, м. Київ, проспект Науки, 37, zabolotnaolena@ukr.net

Метою даної робити є проведення валідації супутникових даних опадів GPM та H-SAF для території України. Валідація здійснювалась шляхом порівняння супутникових даних з даними наземних метеостанцій Українського гідрометцентру і включала такі етапи: збір та опрацювання даних, приведення даних до однакової просторово-часової розмірності, розрахунок коефіцієнтів кореляції та побудова матриць похибок. Коефіцієнти кореляції були розраховані для кожної станції за два досліджуваних періоди (перший період – квітень-вересень 2020 року, другий – квітень-вересень 2021 року). Крім того для більш детального аналізу було побудовано матриці похибок, на основі розділення опадів на класи по різній кількості. Порівняльний аналіз показав, що більша кількість станцій (117) має коефіцієнт кореляції 0.5 - 0.8 для даних GPM, а для даних опадів HSAF більша кількість станцій (59) має низький коефіцієнт кореляції (0 - 0.3). Матриці похибок були розраховані для чотирьох класів кількості опадів (мм): “0-2”, “2-5”, “5-10”, “>10”. Коефіцієнти для матриць похибок показують, що незначні опади чи їх відсутність, а також велика кількість опадів визначаються супутником з високою точністю відповідно до визначень наземних вимірювань метеостанцій. Так, за показником “specificity” найвищий рівень відповідності супутникових даних (H-SAF, GPM Late, GPM Early) наземним даним мають опади класу >10 мм. Значення коефіцієнтів “precision” показують, що супутникові дані є дійсно надійними, тобто, наявність чи відсутність опадів буде визначена точно, оскільки найвище значення цього коефіцієнту характерне саме для низьких та значних опадів (в середньому 0.76 та 0.66 відповідно). Сильні опади або їх відсутність, що зафіксовано супутником, підтверджуються станціями з високою частотою. На основі отриманих результатів можемо стверджувати, що супутникові дані можуть бути використані для моніторингу опадів, оскільки мають високу точність вимірювань і їх варто розглядати як додаткове джерело метеорологічної інформації.

Ключові слова: опади; супутникові дані; наземні дані; порівняння.

1 ВСТУП

Протягом теплого періоду року важливим є постійний моніторинг та прогнозування опадів. Ці вимірювання крім наукових досліджень використовуються переважно в агрометеорологічних моделюваннях та з метою попередження значних збитків від стихійних явищ. Для детальних наукових досліджень, розроблень моделей та програмного забезпечення різних призначень в гідрології чи інших галузях, для яких важливий моніторинг опадів, частота замірів їх інтенсивності чи накопичення за певний період та детальна картина просторового розподілу цих величин мають велике значення. Використання опадомірів з цією метою часто супроводжується труднощами. Метеостанції розташовані досить віддалено (наприклад, в Україні середня відстань між метеорологічними станціями становить близько 45 км), через що великі площі земної поверхні залишаються недослідженими. Дані метеостанцій не можуть достатньо задовольнити вимогу надання детальної інформації розподілення інтенсивності опадів у часі. Супутникові дані надають таку можливість, оскільки виміряні величини мають тривалість часового проміжку між отриманням 15 хвилин або півгодини, залежно від використовуваної системи супутників [1]. Також перевагою супутникового методу є значна просторова щільність розташування точок заміру, що дозволяє отримати детальний опис ситуативної картини опадів. Так, просторова сітка має регулярну відстань між вузлами 0.1 градус (8-10 км). Також до переваг супутникових даних опадів відносять можливість отримання різного рівня точності даних, що в наукових

дослідженнях, наприклад зміни клімату, відіграє визначальну роль. І важливим також є високий рівень зручності опрацювання інформації про інтенсивність опадів та можливість автоматизації проміжних етапів обробки даних[2]. Супутникові методи мають важливе значення при оцінці локального значення опадів, оскільки звичайна інтерполяція наземних вимірювань може призвести до помилкового результату, оскільки точки, які беруться для аналізу є настільки віддаленими, що між ними інтенсивність опадів відрізняється значно і не може бути визначена шляхом інтерполяції значень метеостанцій. Тому висока просторова розрізненість супутникових вимірювань дозволяє вирішити такі ускладнення при визначеннях локальних значень інтенсивності опадів, що в свою чергу дозволяє підвищити якість агрометеорологічних, гідрологічних, кліматичних та інших прикладних досліджень.

Супутникові дані представляють собою вимірювання фізичних параметрів атмосфери, які підлягають обробці комп'ютерними алгоритмами. Але розрахунки необхідних даних на основі отриманих фізичних параметрів часто потребують поправок у вигляді додаткових коефіцієнтів, оскільки містять похибки, які виникають на різних етапах обчислень. Тому початкова супутникова інформація підлягає валідації – оцінці отриманих даних незалежними методами [3]. Валідація представляє собою аналітичне порівняння оцінюваних даних з еталонними даними, які вважаються об'єктивно правильними. При оцінці точності даних дистанційного зондування земної поверхні зазвичай проводять валідацію з використанням наземних вимірювань аналізованих величин [4, 5]. Наземній валідації підлягають супутникові вимірювання, які лежать в основі класифікації типу земної поверхні, властивостей грунту чи водоймищ, значень фізичних величин верхнього шару грунту на сільськогосподарських полях, типу та інтенсивності опадів. Процедура валідації даних є етапом формування супутникової інформації про навколишнє середовище в роботі Національного управління океанографії та атмосфери (NOAA), Європейської організації по експлуатації супутникових даних EUMETSAT, Європейського космічного агентства (ESA), Глобальної системи спостереження за кліматом (GCOS), а також NASA, COPERNICUS та іншими.

Для дослідження процесів опадів, водної циркуляції в атмосфері та динаміки гідрологічних ресурсів командою NASA спільно з японським космічним агенством JAXA було запроваджено проект GPM (Global Precipitation Measurement) [1], який засновується на супутникових методах моніторингу формування опадів. В рамках цієї програми наземна валідація була проведена для прибережної території штату Вірджинія, включаючи проведення польових вимірювань параметрів фізичних характеристик опадів, наприклад, їх інтенсивність, розподіл, форма часток і вид. Наземна валідація використовує інфраструктуру наземних приладів, розроблену для спостереження, кількісного визначення та документування фізичних властивостей опадів [6].

Для валідації даних опадів для різних територій земної поверхні було проведено статистичні аналізи, які описані у роботах для різних територій земної поверхні [7-16].

Метою даної робити є проведення валідації супутникових даних опадів GPM та H-SAF для території України.

2 ВХІДНІ ДАНІ

В якості вхідних даних в роботі були використані супутникові дані опадів та дані опадів з мережі наземних метеостанцій Українського гідрометцентру. Найбільш поширеними провайдерами супутникових даних інтенсивності опадів є проекти GPM (Global Precipitation Measurement) та H-SAF (Hydrology Satellite Application Facility) [1,2].

2.1 Наземні дані метеостанцій

Станом на періоди, що досліджувались (квітень - вересень 2020 року та квітень - вересень 2021 року) в Україні функціонувало 155 метеостанцій (рис.1), які підпорядковуються Українському гідрометеорологічному центру (УкрГМЦ). Дані з метеостанцій надходять в головний телекомунікаційний центр УкрГМЦ у форматі телеграми SYNOP [17]. У телеграмі дані опадів представлені у вигляді суми за різні періоди: у телеграмі, яка отримується о 9:00 сума кількості опадів надана за три години, у телеграмі, яка отримується о 12:00 сума кількості опадів надана за шість годин. За 18:00 - сума кількості опадів надана за 12 годин. Для даного дослідження було використано дані суми опадів за найдовший період - за 12 годин, а саме - з 6:00 по 18:00.

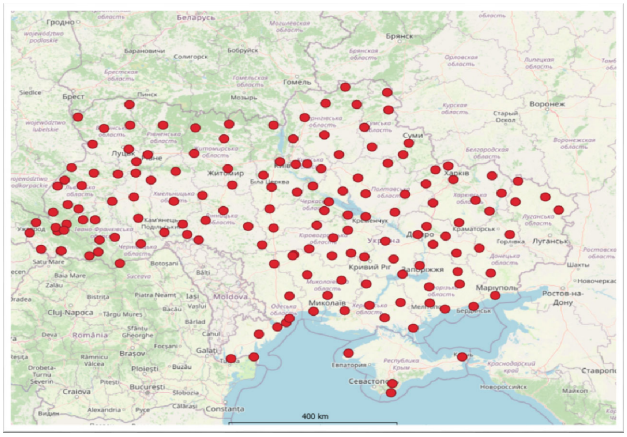


Рис. 1 – Мережа метеостанцій Українського Гідрометцентру
Fig. 1 – Network of weather stations of the Ukrainian Hydrometeorological Center

2.2 Супутникові дані GPM

В рамках проекту GPM опади вимірюються на широтах від 65°Пн.ш до від 65°Пд.ш. Основна обсерваторія (геостаціонарний супутник) GPM має перший космічний двочастотний радар вимірювання опадів Ku/Ka-діапазону (DPR) і багатоканальний мікрохвильовий тепловізор GPM (GMI). Прилад DPR складається з радара опадів Ka-діапазону (KaPR), що працює на частоті 35,5 ГГц, і радара опадів Ku-діапазону (KuPR), що працює на частоті 13,6 ГГц. DPR забезпечує тривимірні вимірювання структури та характеристик опадів в смузі до 245 км для обох радарів. Порівняно з радаром опадів TRMM [3], DPR більш чутливий до невеликого дощу та снігопаду. Крім того, одночасні вимірювання за допомогою перекриття Ka/Ku-смуг DPR можуть надати інформацію про розподіл розмірів крапель частинок при помірній інтенсивності опадів. Прилад GMI є багатоканальним мікрохвильовим радіометром із конічним скануванням, що охоплює смугу довжиною 885 км і має тринадцять каналів із діапазоном частот від 10 ГГц до 183 ГГц. GMI використовує набір частот, які були оптимізовані протягом останніх двох десятиліть для отримання сильних, помірних і незначних опадів, використовуючи різницю поляризації в кожному каналі як індикатор оптичної товщини, вмісту води в опадах. Дані проекту GPM представляють собою інтенсивність опадів мм/год, отримуються кожні півгодини.

Алгоритм для обробки первинних супутникових вимірювань Integrated MultisatellitE Retrievals for GPM (IMERG) поєднує інформацію з угруповання супутників GPM для оцінки опадів на більшій частині поверхні Землі. Цей алгоритм призначений для інтер калібрування, об'єднання та інтерполяції супутникових мікрохвильових даних по визначенню опадів разом із інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням для аналізу опадів в глобальному масштабі. Розрізняють три режими відновлення інтенсивності опадів: early, late і final. Early - формується за 4 години після супутникового вимірювання. Late- формується за 14 годин, final - через 3,5 місяців після супутникових вимірювань [1].

2.3 Супутникові дані H-SAF

Вимірювання опадів системою супутників EUMETSAT входить до загального проекту по прикладній гідрології та раціональному використанню водних ресурсів Operational Hydrology and Water Management: Hydrology – Satellite Application Facility (H-SAF), який був затверджений 3 липня 2005 року організацією EUMETSAT [18]. Дані HSAF були отримані супутниковою системою EUMETCAST. Дані проекту H-SAF формуються кожні 15 хвилин та є кількістю опадів в мм/год. Дані, які отримувались для аналізу - це H03B (P-IN-SEVIRI – інтенсивність опадів на поверхні, виміряна за допомогою геостаціонарних супутників з інфрачервоним вимірюванням (GEO/IR (Geostationary Earth Orbit/infrared). Алгоритм отримання опадів заснований на інтеркалібруванні вимірювань GEO/IR зображень з даними низько-орбітальних мікрохвильових сенсорів пасивного зондування. В якості GEO/IR зображень використовуються дані радіометру SEVIRI на борту супутників METEOSAT другого покоління (MSG). Роздільна здатність змінюється від трьох км біля підсупутникової точки до 8 км в середньому над Європою. Просторове покриття включає площу H-SAF (Європа та басейн Середземного моря) та Африку і південну частину Атлантичного океану в межах координат LAT 60^{o}S – 67^{o}N, LON 80^{o}W – 80^{o}E.

2.4 Опрацювання та підготовка даних

Для аналізу відповідності супутникових даних вимірюванням наземних метеостанцій бралися показники опадів за два періоди (квітень-вересень 2020 року та квітень-вересень 2021 року). Теплий період є найоптимальнішим для аналізу опадів в помірних широтах, оскільки

для цього періоду притаманна висока активність конвективних процесів, що дає можливість аналізувати різну інтенсивність опадів. В холодний період року на території України спостерігається переважно шарувата хмарність, яка не дозволяє виявляти опади різної інтсенсивності.

Виміряні величини, які отримуються із супутникових серверів були відібрані для території України, в координатах, де знаходяться метеостанції (за методом «найближчого сусіда») і розраховані суми опадів з 6:00 до 18:00 за квітень – вересень 2020 та 2021 років. Для розрахунку були взяті дані GPM Late та GPM Early за 2020 та 2021 роки і дані H-SAF за 2021 рік. Кількість метеостанцій, для яких було розраховано порівняльні показники для GPM становить 155, для H-SAF – 127. Для порівняння супутникові та наземні дані приводилися до співставних величин, а саме денних сум опадів із 6:00 до 18:00. Для цього дані метеостанцій отримувалися у вигляді суми кількості опадів за даний період, а супутникові дані, які були завантажені за кожні півгодини даного періоду в одиницях інтенсивності (мм/год) – були перераховані в кількість за годину, після чого була розрахована сума за вказаний часовий період.

Таблиця 1 - Фрагмент таблиці вхідних даних опадів (наземні та супутникові дані GPM)
Table 1 – A fragment of the precipitation input data table (GPM ground-based and satellite data)

Станція	Дата	Значення опадів (станція),мм	Значення опадів (супутник),мм
33049	02.04.2021	2	0,11
33049	03.04.2021	0	0
33049	04.04.2021	0	0
33049	05.04.2021	0	0
33049	06.04.2021	0	0,07
33049	07.04.2021	7	4,17
33049	08.04.2021	0,3	0
33049	09.04.2021	0	0
33049	10.04.2021	0	0
33049	11.04.2021	0	0
33049	12.04.2021	0	0,44
33049	13.04.2021	0	1,58
33049	14.04.2021	0	0,97
33049	15.04.2021	0	0
33049	16.04.2021	4	1,71
33049	17.04.2021	3	3,06
33049	18.04.2021	0	0,01
33049	19.04.2021	0	0

В таблиці 1 показано фрагмент вхідного файлу для порівняння супутникових даних GPM Early із наземними. Такі таблиці формувались для опрацювання програмними засобами статистичного аналізу. В таблиці відображено номер станції, дату і денну суму опадів за вказаний вище період за даними метеостанцій та супутника, відповідно. Загальна кількість рядків (спостережень) для порівняння даних GPM Early (2020) становить 27906, GPM Early (2021) - 24482, GPM Late (2020) - 27906, GPM Late (2021) - 24482, HSAF – 18928. Різниця в кількості спостережень між даними GPM і H-SAF пов'язана з тим, що таблиця даних GPM включає денні суми опадів за період квітень-вересень на 155 метеостанціях, а таблиця даних H-SAF - квітень-серпень на 127 метеостанціях.

3 МЕТОДИКА

Для валідації супутникових даних було проведено їх порівняльний аналіз за допомогою розрахунку коефіцієнтів кореляції та матриць невідповідностей за класами кількості опадів. Коефіцієнти кореляції були розраховані для кожної станції за кожен із двох досліджуваних періодів, а також середні значення кореляції для кожного періоду. Матриці похибок застосовуються при оцінці точності комп'ютерної класифікації [19,20,21]. Як метод аналізу для валідації супутникових даних, матриці похибок будувалися для відображення точності вимірювань в межах певних діапазонів (класів) опадів. Тобто в якості класів бралися декілька діапазонів кількості опадів і визначалося, скільки супутникових значень в певному діапазоні співпадають із цим же діапазоном значень опадів метеостанцій. Всі значення кількості опадів були поділені на такі діапазони (класи): 0-2 мм, 2-5 мм, 5-10 мм, >10 мм за 12 годин.

Основні метричні показники та значення матриць невідповідностей (похибок), які були використані в даній роботі приведені нижче.

Acuracy (A)– ефективність класифікації – частота відповідності супутникового значення певного діапазону такому ж діапазону значення метеостанції. Визначається як:

$$A = (TP+TN)/(TP+TN+FP+FN), \quad (1)$$

де TP (True Positive) – правильно визначений клас, тобто значення супутника знаходиться в тому ж самому діапазоні (класі), що і значення метеостанції; TN (True Negative) – значення супутника не входить до даного класу як і

значення станції; FP (False Positive)– значення супутника було класифіковано в такий клас, до якого не належить значення метеостанції; FN (False Negative) – значення супутника не було класифіковано в той клас, в якому знаходиться значення станції.

Recall/Sensitivity (*R*) – чутливість – відображає, як часто супутникове значення, яке не потрапляє в даний діапазон, відповідає значенню станції також поза межами цього ж діапазону

$$R= TP/(TP+FN). \quad (2)$$

Specificity (*S*) – специфічність класифікації. Дана величина показує як часто супутникова сума опадів знаходиться в тому ж діапазоні, що і значення цієї суми за показанням станції

$$S = TN/(TN+FP). \quad (3)$$

Precision (*P*) – частка супутникових значень з діапазону, який розглядається, які співпадають із діапазоном значення станції [19]

$$P = TP/(TP+FP). \quad (4)$$

Отже основними супутниковими даними для яких була проведена валідація на базі вище перерахованих метрик були наступні: GPM Early, GPM Late та H-SAF. GPM Early були взяті для аналізу, як найбільш оперативні, GPM Late - як більш точні. Для GPM Final валідація не проводилась, оскільки ці дані мають тривалий час обробки і використовуються у вузьких сферах наукових досліджень.

Коефіцієнт кореляції розраховувався для сум опадів за супутниковими даними та даними метеостанцій. Було розраховано кореляції для кожної станції в середньому за сезон 2021-го та 2020-го років.

Обчислення виконувалися з використанням програмного середовища для статистичних обчислень R.

4 РЕЗУЛЬТАТИ

Порівняльний аналіз показав, що більша кількість станцій (117) має коефіцієнт кореляції 0.5 - 0.8 для даних GPM, а для даних опадів HSAF більша кількість станцій (59) має низький коефіцієнт кореляції (0 - 0.3). GPM Late, як більш точні дані, дійсно мають в результаті більшу кількість метеостанцій з вищим коефіцієнтом кореляції в порівнянні з іншими даними (табл.2) Середній по станціях коефіцієнт кореляції опадів за даними GPM показано в таблиці 3.

Таблиця 2 – Кількість метеостанцій з відповідним коефіцієнтом кореляції
Table 2 - The number of weather stations with the corresponding correlation coefficient

Коефіцієнт кореляції	**Early 2020**	**Late 2020**	**Early 2021**	**Late 2021**	**H-SAF 2021**
0-0.3	2	1	12	8	59
0.3-0.5	26	19	28	30	46
0.5-0.8	117	119	108	106	22
0.8 - 1.0	10	16	7	11	0

Таблиця 3 – Середній коефіцієнт кореляції для двох досліджуваних періодів
Table 3 - The average correlation coefficient for the two studied periods

період (квітень-вересень)	**GPM Late**	**GPM Early**	**H-SAF**
2020	0,66	0,62	-
2021	0,59	0,57	0,33

На рисунках 2-6 показано кольоровим відображенням значення коефіцієнту кореляції на кожній метеостанції (червоний – 0 – 0.3, оранжевий – 0.3-0.5, зелений – 0.5 – 0.8, синій – більше 0.8)

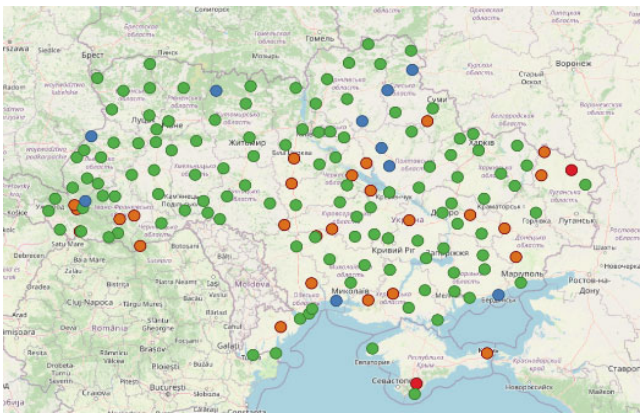


Рис.2 – Розподіл коефіцієнтів кореляції для даних GPM Early (2020)
Fig.2 - Distribution of correlation coefficients for GPM Early data (2020)

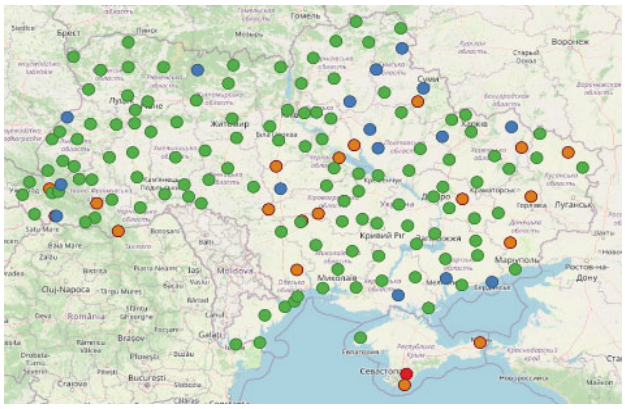


Рис.3 – Розподіл коефіцієнтів кореляції для даних GPM Late (2020)
Fig.3 - Distribution of correlation coefficients for GPM Late data (2020)

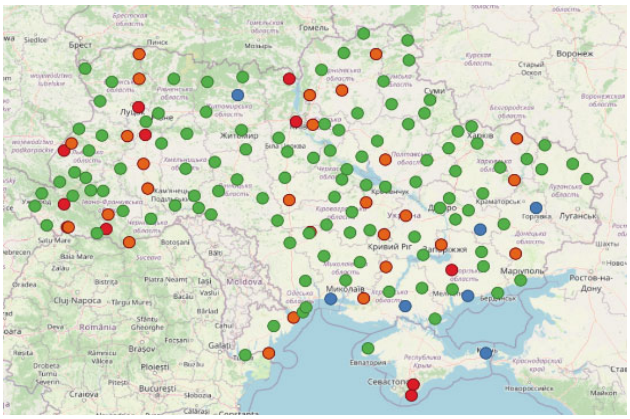


Рис.4 – Розподіл коефіцієнтів кореляції для даних GPM Early (2021)
Fig.4 - Distribution of correlation coefficients for GPM Early data (2021)

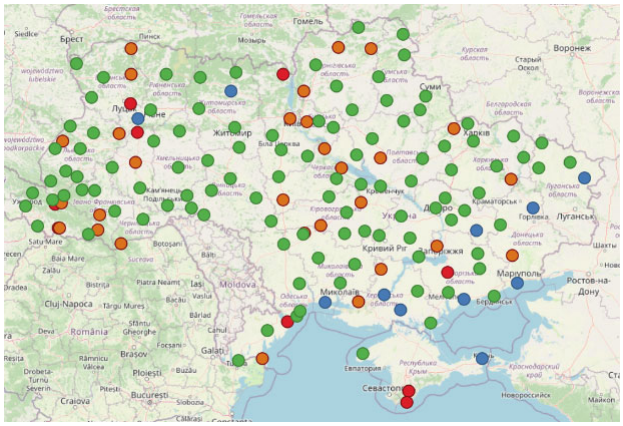


Рис.5 - Розподіл коефіцієнтів кореляції для даних GPM Late (2021)
Fig.5 - Distribution of correlation coefficients for GPM Late data (2021)

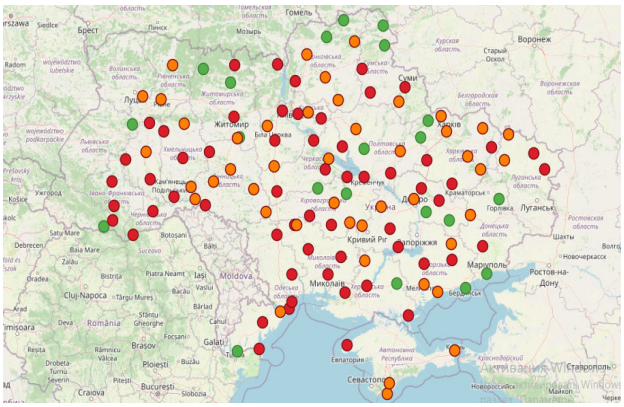


Рис.6 – Розподіл коефіцієнтів кореляції для даних H-SAF (2021)
Fig.6 - Distribution of correlation coefficients for GPM H-SAF data (2020)

Спостерігається закономірність розподілу низьких коефіцієнтів кореляції у гірських районах досліджуваної території, що можна пояснити особливо активними, нестабільними, з постійною мінливою динамікою процесами середніх шарів атмосфери, які порушують прямий зв'язок процесів на поверхні землі із зонами формування опадів, а саме зародження опадів швидко віддаляється від місця їх випадіння на землю.

Таблиці 4-8 представляють собою матриці похибок, розраховані для чотирьох класів кількості опадів (мм): "0-2", "2-5", "5-10", " >10" як сума за 12 годин. Матриці похибок показують розподіл числа спостережень за класами кількості опадів. У таблиці 9 наведено коефіцієнти точності, розраховані на основі матриць похибок.

Таблиця 4 - Матриця похибок для даних GPM Early періоду квітень-вересень 2021 (точність класифікації, A = 0.82)
Table 4 – Confusion matrix for GPM Early data for April-September 2021(classification accuracy, A = 0.82)

Супутник / Станція	0-2	2-5	5-10	>10
0-2	21482	1162	514	306
2-5	919	475	408	346
5-10	304	281	323	355
>10	120	154	217	540

Таблиця 5 - Матриця похибок для даних GPM Late періоду квітень-вересень 2021 (точність класифікації, A = 0.82)
Table 5 – Confusion matrix for GPM Late data for April-September 2021(classification accuracy, A = 0.82)

Супутник / Станція	0-2	2-5	5-10	>10
0-2	21552	1082	507	323
2-5	903	482	404	359
5-10	280	280	337	366
>10	109	141	231	550

Таблиця 6 -Матриця похибок для даних GPM Early періоду квітень-вересень 2020 (точність класифікації, A = 0.81)
Table 6 – Confusion matrix for GPM Early data for April-September 2020 (classification accuracy, A = 0.81)

Супутник / Станція	0-2	2-5	5-10	>10
0-2	18803	1085	540	266
2-5	626	436	353	314
5-10	260	235	281	379
>10	98	113	191	502

Таблиця 7 - Матриця похибок для даних GPM Late періоду квітень-вересень 2020 (точність класифікації, A = 0.83)
Table 7 – Confusion matrix for GPM Late data for April-September 2020 (classification accuracy, A = 0.83)

Супутник / Станція	0-2	2-5	5-10	>10
0-2	18982	1028	464	220
2-5	603	439	367	320
5-10	231	248	316	360
>10	91	122	173	528

Таблиця 8 - Матриця похибок для даних H-SAF періоду квітень-серпень 2021 (точність класифікації, A = 0.79)
Table 8 – Confusion matrix for H-SAF data for April-September 2021(classification accuracy, A = 0.79)

Супутник / Станція	0-2	2-5	5-10	>10
0-2	13788	661	384	375
2-5	885	188	143	195
5-10	447	135	89	141
>10	286	90	99	251

Таблиця 9 – Коефіцієнти класифікації матриць похибок (P – precision, R – recall, S – specificity)
Table 9 – Classification coefficients of confusion matrices (P – precision, R – recall, S – specificity)

	GPM Early 2020			GPM Early 2021			GPM Late 2020			GPM Late 2021			H-SAF 2021		
мм	**P**	**R**	**S**	**P**	**R**	**S**	**P**	**R**	**S**	**P**	**R**	**S**	**P**	**R**	**S**
0-2	0.77	0.95	0.59	0.77	0.94	0.60	0.79	0.95	0.62	0.78	0.94	0.62	0.69	0.89	0.48
2-5	0.59	0.23	0.94	0.58	0.23	0.93	0.59	0.24	0.94	0.59	0.24	0.93	0.55	0.17	0.93
5-10	0.58	0.21	0.96	0.59	0.22	0.96	0.60	0.24	0.96	0.59	0.22	0.96	0.54	0.12	0.96
>10	0.66	0.34	0.98	0.66	0.35	0.98	0.68	0.37	0.98	0.66	0.34	0.98	0.62	0.26	0.97

За показником “specificity” найвищий рівень відповідності супутникових даних (H-SAF, GPM-Late, GPM-Early) наземним даним мають опади діапазону >10 мм (таблиця 9). Низьке значення коефіцієнту “specificity” для діапазону 0-2 мм пояснюється тим, що супутникові методи здатні фіксувати дуже низькі значення кількості опадів, в той час коли станція показує їх відсутність – 0 мм. Так, згідно зі значеннями матриць похибок, бачимо, що велика частина значень наземних вимірювань опадів діапазону

0-2 мм, показана супутниковим методом як 2-5 мм. Також бачимо, що клас 2-5 мм за супутником має найбільшу сплутаність із класом 0-2 мм за станцією (для H-SAF, GPM-Late, GPM-Early). Але спираючись на високі значення коефіцієнтів "recall" для діапазону 0-2 мм (для H-SAF, GPM-Late, GPM-Early), можемо зробити висновок, що коли станція не показує таку кількість опадів (0-2 мм), то супутник теж показує інший клас значень. Значення коефіцієнтів "precision" показують, що супутникові заміри є дійсно надійними, тобто, наявність чи відсутність опадів буде визначена точно, оскільки найвище значення цього коефіцієнту характерне саме для низьких та значних опадів.

Таким чином, супутник може показувати наявність малої кількості опадів, таку, що опадоміри станції не фіксують, тобто відображають 0 мм. Так само деяка частка значень, які входять у діапазон 2-5 мм супутником фіксуються, а на станції це приймається за нуль. Сильні опади або їх відсутність, що зафіксовано супутником, підтверджуються станціями з високою частотою. Також варто зазначити, що покласовий порівняльний аналіз опадів підтвердив відносно низьку якість супутникових даних H-SAF у порівнянні із даними GPM відповідно до отриманих коефіцієнтів точності матриць похибок.

На основі отриманих результатів можемо стверджувати, що супутникові дані можуть бути використані для моніторингу опадів, оскільки мають високу точність вимірювань і їх варто розглядати як додаткове джерело інформації у разі відсутності наземних даних. Відхилення супутникових значень від наземних пояснюються складностями обробки супутникових вимірювань при обчисленні кількості опадів.

Основна причина невідповідностей наземних та супутникових значень полягає в тому, що визначення опадів на наземних станціях охоплюють дуже маленьку площу вимірювання (є точковим), щодо супутникових даних, то найменша просторова одиниця вимірювання, що була доступна в межах даного дослідження, є піксель розміром 0.1 x 0.1 градус. Також на наявність похибки у валідації впливає те, що для отримання даних опадів супутниковим методом виконується багато проміжних розрахунків на основі вимірювань температури верхнього шару, розміру крапель та ін. Крім того, на наявність похибки впливає відмінність у просторовому аспекті вимірювань (супутник - 0.1x0.1 градус, станція - точкове вимірювання) [22,23,24].

5 ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було розраховано кількісні характеристики порівняльного аналізу опадів за супутниковими даними та за даними наземних метеостанцій. Було визначено коефіцієнти кореляції (GPM Late 2020 = 0,66; GPM Late 2021 = 0,59; GPM Early 2020 = 0,62 GPM Early 2021 = 0.57; H-SAF 2021 = 0.33). А також було проведено покласовий аналіз за домогою розрахунку матриць похибок. Точність класифікації ("accuracy") становила: H-SAF = 0.79, GPM Early 2021 = 0.82, GPM Late 2021 = 0.82, GPM Early 2020 = 0,81, GPM Late 2020 = 0,83. Аналіз отриманих величини коефіцієнтів матриць похибок показав, що наявність чи відсутність опадів визначається точно. Конкретне значення кількості опадів визначається менш точно, але це може бути пов'язано із похибками валідації, які спричинені як складними етапами формування супутникових даних (розрахунок на основі фізичних параметрів хмар), так і різницею між просторовою роздільною здатністю супутникових та наземних методів (площа пікселя та точково). Отже результати роботи показали, що супутникові дані інтенсивностей опадів мають достатню відповідність для використання їх при виконанні практичних задач, наукових дослідженнях та в якості вхідних даних у створених системах моніторингу [25, 26]. Крім того, супутникові дані опадів можна комбінувати з даними системи грозопеленгації України [26, 27] для отримання опадів у більш високій просторово-часовій роздільній здатності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Data | NASA Global Precipitation Measurement Mission. URL: https://gpm.nasa.gov/data (Accessed 31.08.2021)
2. EUMETSAT | Monitoring the weather and climate from space | EUMETSAT. URL: https://www.eumetsat.int/ (Accessed 31.08.2021)
3. Global Precipitation Mission (GPM). Ground Validation System. Validation Network Data Product User's Guide. Volume 2, November 16, 2015.
4. Review of validation standards of Earth Observation derived biophysical products / M. Soto-Berelov, S. Jones, E. Farmer, W. Woodgate. 2015.
5. Кривошеїн О. О. Порівняння наземних вимірювань сонячної радіації із супутниковими даними в межах областей України за період 2001–2009 рр. *Часопис картографії*, 2013. 9. С.93-103.

6. Ground Validation | NASA Global Precipitation Measurement Mission. URL: https://gpm.nasa.gov/science/ground-validation (Accessed 31.08.2021)
7. Mathew R., Schwaller K., Robert Morris. A Ground Validation Network For The Global Precipitation Measurement Mission. *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*. March 2011. Vol.28.
8. Validation of rainfall data estimated by GPM satellite on Southern Amazon region / Luiz Octavio Fabriciodos Santos, Carlos Alexandre Santos Querino, Juliane Kayse Albuquerqueda Silva Querino, etc. *Revista Ambiente&Água*. 2019. Vol. 14(1).
9. Ground Validation of GPM IMERG Precipitation Products over Iran / Fatemeh Fadia Maghsood, Hossein Hashemi, Seyyed Hasan Hosseini, Ronny Berndtsson. *Remote Sens*. 2020. Vol.12(1).
10. Developments in the 'validation' of satellite sensor products for the study of the land surface / Justice C., Belward A., Morisette J., Lewis P., Privette J., Baret F. *Remote sensing*. 2000. Vol. 21(17).
11. Validation of Satellite and Merged Rainfall Data over Ghana, West Africa / Winifred Ayinpogbilla Atiah, Leonard Kofitse Amekudzi, Jeffrey Ni iArmah Aryee, Kwasi Preko, Sylvester Kojo Danuor. *Atmosphere*. 2020. #11
12. Validation of new satellite rainfall products over the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia / Getachew Tesfaye, Tsegaye Tadesse, Berhan Gessesse, Tufa Dinku. *Atmos. Meas. Tech. Discuss*. November 2017
13. Haral Feidas. Validation of the H-SAF precipitation products over Greece using rain gauge data / Associate Scientist Activity hsaf. Final Report. Aristotle University of The Saloniki. July 2015.
14. Measuring precipitation in Eastern Himalaya: Ground validation of eleven satellite, model and gauge interpolated gridded products / Manish Kumar, Oivind Hodnebroe, Anne Sophie Daloz, Sumit Sen, Shrinivas Badiger, Jagdish Krishnasamy. *Journal of Hydrology August*. 2021. #599.
15. Validation of TRMM and FEWS Satellite Rainfall Estimates with Rain Gauge Measurement over Ashanti Region, Ghana / Leonard K. Amekudzi, Marian A. Osei, Winifred A. Atiah, Jeffrey N. A. Aryee, Maureen A. Ahiataku, Emmanuel Quansah, KwasiPreko, Sylvester K. Danuor, Andreas H. Fink. *Atmospheric and Climate Sciences*. 2016. Vol.6(4).
16. Global Precipitation Measurement (GPM) Ground Validation (GV) Prototype in the Korean Peninsula / Ji-Hye Kim, Mi-Lim Ou, Jun-Dong Park, Kenneth R. Morris, Mathew R. Schwaller, David B. Wolf. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. 2014. Vol.31.
17. Commission for synoptic meteorology. Abridged final report. World meteorological organization. Geneva, 1970 .
18. Chris Cohoon, Owen Kelley. Accessing the PPS Near Real Time Data using HTTPS and the jsimpson https Server. 11 June 2020
19. Rodrigues Fernandes J. L. Analysis of Classification Algorithms for Crop Detection using LANDSAT 8 images / Universidade Nova. 2015
20. Кривошеїн О. О. Кривобок О. А., Адаменко Т. І. Система визначення площ посівів основних сільськогосподарських культур України за супутниковими даними. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. №26. С. 78-90. https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.07
21. Kyvobok O., Kryvoshein O., Adamenko T. Peculiarities of technological adaptation of the CGMS system for agricultural crops monitoring in Ukraine. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. № 22. С. 64-79. https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.07
22. GPM Satellite Simulator over Ground Validation Sites / Toshihisa Matsui, Takamichi Iguchi, Xiaowen Li, Mei Han, Wei-Kuo Tao, Walter Petersen, Tristan L'Ecuyer, Robert Meneghini, William Olson, Christian D. Kummerow, Arthur Y. Hou , Mathew R. Schwaller, Erich F. Stocker, John Kwiatkowski. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2013. Vol. 94(11). Pp. 1653–1660
23. HSAF Precipitation products / Davide Melfi, Marco Galli, Valentina Rosati, Stefano Dietrich. *Conference: Satellite inspired hydrology in an uncertain future: an H SAF and HEPEX work shop*. At: Reading (UK). November 2019.
24. Preparations for Global Precipitation Measurement (GPM) ground validation / S.W. Bidwell; J.F. Durning; D.F. Everett; M.R. Schwaller; E.A. Smith; D.B. Wolff. *IGARSS 2004. International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2004
25. Перспективи використання супутникової інформації для моніторингу досягнення цілей сталого розвитку України. Аналітична доповідь / Інститут космічних досліджень НАН України і ДКА України. Київ, 2020.
26. Український сегмент системи грозопеленгації ENTLN / Кривобок О. А., Кривошеїн О. О., Коман М. М. Крупа Є. О. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2018. №21. С. 5-20. https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.01
27. Заболотна О. С, Кривошеїн О.О., Кривобок О. А. Моніторинг кількості опадів за супутниковими даними та даними грозопеленгації для території України. *Тези доповідей Другого Всеукраїнського гідрометеорологічного з'їзду*. 2021. С. 164-165

REFERENCES

1. *Data | NASA Global Precipitation Measurement Mission*. Available at: https://gpm.nasa.gov/data (Accessed 31.08.2021)
2. *EUMETSAT | Monitoring the weather and climate from space* | EUMETSAT. Available at: https://www.eumetsat.int/ (Accessed 31.08.2021)
3. *Global Precipitation Mission (GPM). Ground Validation System.* Validation Network Data Product User's Guide. Volume 2, November 16, 2015.
4. Soto-Berelov, M, Jones, S., Farmer, E., & Woodgate, W. (2015). *Review of validation standards of Earth Observation derived biophysical products*.
5. Kryvoshein, O.O. (2013). Porivniannia nazemnykh vymiriv soniachnoi radiasii z suputnykovymy danymy v mezhakh oblastei Ukrainy za period 2001-2009rr. [Comparison of terrestrial measurements of solar radiation with satellite data within the regions of Ukraine for the period 2001–2009]. *Journal of Cartography*, 9, pp.93-103. (in Ukr)
6. *Ground Validation | NASA Global Precipitation Measurement Mission*. Available at: https://gpm.nasa.gov/science/ground-validation (Accessed 31.08.2021)
7. Mathew R., Schwaller & RobertMorris, K. (2011). A Ground Validation Network For The Global Precipitation Measurement Mission. *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*, 28 (March).
8. Luiz Octavio Fabriciodos Santos, Carlos Alexandre Santos Querino, Juliane Kayse Albuquerqueda Silva Querino, Altemar Lopes Pedreira Junior, Aryanne Resendede Melo Moura, Nadja Gomes Machado & Marcelo Sacardi Biudes.

(2019). Validation of rainfall data estimated by GPM satellite on Southern Amazon regio. *Revista Ambiente&Água*, vol. 14(1).
9. Fatemeh Fadia Maghsood, Hossein Hashemi, Seyyed Hasan Hosseini & Ronny Berndtsson.(2020). Ground Validation of GPM IMERG Precipitation Products over Iran. *Remote Sens*., 12(1).
10. Justice, C., Belward, A., Morisette, J., Lewis, P., Privette, J. & Baret, F. (2000). Developments in the 'validation' of satellite sensor products for the study of the land surface. *Remote sensing*, vol. 21(17).
11. Winifred Ayinpogbilla Atiah, Leonard Kofitse Amekudzi, Jeffrey Ni iArmah Aryee, Kwasi Preko & Sylvester Kojo Danuor. (2020). Validation of Satellite and Merged Rainfall Data over Ghana. *West Africa. Atmosphere*, 11.
12. Getachew Tesfaye, Tsegaye Tadesse, Berhan Gessesse & Tufa Dinku. (2017). Validation of new satellite rainfall products over the Upper Blue Nile Basin. *Ethiopia. Atmos. Meas. Tech. Discuss*. November 2017
13. *Haral Feidas Validation of the H-SAF precipitation products over Greece using rain gauge data. Associate Scientist Activity hsaf.* Final Report. Aristotle University of The Saloniki. July 2015.
14. Manish Kumar, Oivind Hodnebroe, Anne Sophie Daloz, Sumit Sen & Jagdish Krishnasamy. (2021). Measuring precipitation in Eastern Himalaya: Ground validation of eleven satellite, model and gauge interpolated gridded products. *Journal of Hydrology August*, 599.
15. Leonard K. Amekudzi, Marian A. Osei, Winifred A. Atiah, etc. (2016). Validation of TRMM and FEWS Satellite Rainfall Estimates with Rain Gauge Measurement over Ashanti Region, Ghana. *Atmospheric and Climate Sciences*, vol.6(4).
16. Ji-Hye Kim, Mi-Lim Ou, Jun-Dong Park etc. (2014). Global Precipitation Measurement (GPM) Ground Validation (GV) Prototype in the Korean Peninsula. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, Vol. 31.
17. *Commission for synoptic meteorology. Abridged final report.* World meteorological organization. Geneva, 1970
18. Chris Cohoon & Owen Kelley. (2020). *Accessing the PPS Near Real Time Data using HTTPS and the jsimpson https Server*, 11 June 2020
19. Rodrigues Fernandes, J. L. (2015). *Analysis of Classification Algorithms for Crop Detection using LANDSAT 8 images.* Universidade Nova.
20. Kryvoshein, O.O., Kryvobok, O.A., Adamenko, T.I. (2020). Systema vyznachenia ploshch posiviv osnovnykh silskohospodarskykh kultur Ukrainy za suputnykovymy danymy [Satellite-based system of area estimation for main agricultural crops of Ukraine]. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 26, pp. 78-90. (in Ukr). https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.07
21. Kryvobok, O.A., Kryvoshein, O.O.; Adamenko, T.I. (2018). Peculiarities of technological adaptation of the CGMS system for agricultural crop monitoring in Ukraine. *Ukrainian hydrometeorological journal,* 22, pp. 64-79. https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.07
22. Toshihisa Matsui, Takamichi Iguchi, Xiaowen Li, Mei Han etc. (2013). GPM Satellite Simulator over Ground Validation Sites. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol.94(11), pp. 1653–1660
23. Davide Melfi, Marco Galli, Valentina Rosati & Stefano Dietrich. (2019). HSAF Precipitation products. *Conference: Satellite inspired hydrology in an uncertain future: an H SAF and HEPEX work shop*. At: Reading (UK) November 2019.
24. Bidwell, S.W., Durning, J.F. Everett, D.F. etc. (2004). Preparations for Global Precipitation Measurement (GPM) ground validation. IGARSS 2004. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004
25. *Perspektyvy vykorystannia suputnykovoi informatsii dlia monitorynhu dosiahnennia tsilei staloho rosvytku Ukrainy [Prospects for the use of satellite information for monitoring the achievement of Ukraine`s sustainable development goals]*. Analytical report. Institute of space research of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine. Kyiv, 2020 (in Ukr)
26. Kryvobok, O.A., Kryvoshein, O.O., Koman, M.M. & Krupa, E.O. (2018). Ukrainskii sehment systemy hrozopelenhatsii ENTLN (LIGHTNING FINDING SYSTEM) [Ukrainian segment of the ENTLN (LIGHTNING FINDING SYSTEM)]. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 21, pp.5-20. https://doi.org/10.31481/uhmj.21.2018.01 (in Ukr)
27. Zabolotna, O.S., Kryvoshein, O.O. & Kryvobok, O.A. (2021). Monitorynh kilkosti opadiv za suputnykovymy danymy ta danymy hrozopelenhatsii dlia terytorii Ukrainy [Monitoring of the amount of precipitation according to the satellite data and sunderstorm forecasting data for the territory of Ukraine]. *Abstracts of reports of the second Ukarinian Hydrometeorological Congress*, pp.164-165. (in Ukr)

VALIDATION OF PRECIPITATION OBTAINED FROM GPM AND H-SAF SATELLITE DATA WITH RELATION TO UKRAINIAN GROUND WEATHER STATIONS' DATA

O. S. Zabolotna, O. O. Kryvoshein, O. A. Kryvobok

Ukrainian Hydrometeorological Institute,
37 Nauki av., 03028, Kyiv, Ukraine, zabolotnaolena@ukr.net

The main objective of this study is to validate H-SAF and GPM satellite precipitation data for the territory of Ukraine. Validation was carried out by comparing satellite data with data from ground weather stations of Ukrainian Hydrometeorological Center and included the following stages: data collection and processing, bringing the data to the same spatial and temporal resolution, calculation of correlation coefficients and construction of confusion matrices. Correlation coefficients were calculated for each of the stations for two studied periods (the first period - April-September 2020, the second period - April-September 2021). In addition, to ensure

a more detailed analysis, confusion matrices were constructed based on division of precipitation into classes of different intensity. The comparative analysis showed that a larger number of stations (117) has a correlation coefficient of 0.5 - 0.8 with relation to GPM data, and, as for HSAF precipitation data, a larger number of stations (59) has a low correlation coefficient (0 - 0.3). Confusion matrices were calculated for the following four classes of rainfalls (mm): “0-2”, “2-5”, “5-10”, “>10”. The confusion matrices coefficients showed that low-intensity precipitation or “no precipitation”, as well as high-intensity precipitation, can be determined by a satellite with high accuracy as opposed to the ground-based weather station measurements. Thus, according to the "specificity" indicator, a precipitation class >10 mm has the highest level of correspondence of satellite data (H-SAF, GPM Late, GPM Early) to ground data. The low value of the "specificity" for the range of 0-2 mm is explained by the fact that satellite methods are able to detect very low values of precipitation intensity, while the station shows their absence – 0 mm. Thus, according to the values of the confusion matrices, we see that a large part of the values of ground measurements of precipitation in the range of 0-2 mm are shown by the satellite method as “2-5 mm” class. We can also see that the “2-5 mm” class by satellite has the most confusion with the 0-2 mm class by station (for H-SAF, GPM Late, GPM Early). But based on the high values of the "recall" for the range of 0-2 mm (for H-SAF, GPM Late, GPM Early), we can conclude that when the station does not show this amount of precipitation (0-2 mm), then the satellite also shows another class of values. The values of "precision" coefficient show that the satellite measurements are actually reliable. This means that presence or absence of precipitation may be determined precisely, since the highest value of the "precision" coefficient is typical for low and high amounts of precipitation (on average 0.76 and 0.66, respectively). Detected by satellites, heavy precipitation or no precipitation are also confirmed in most cases by ground stations. Based on the results of the validation, GPM and H-SAF satellite precipitation data products can be used for rainfall monitoring and considered as an additional source of meteorological information.

Key words: precipitation, satellite data, ground data, comparison

Подання до редакції **: 01. 07. 2023**
Надходження остаточної версії **: 07. 12. 2023**
Публікація статті : **21. 12. 2023**

Ukrainian hydrometeorological journal, 2023, 32, 16-33 doi: 10.31481/uhmj.32.2023.02
ISSN 2311-0902 (print), 2616-7271 (online)

УДК 551.513.2, PACS: 92.60.Bh, 92.60.hv

КЛАСИФІКАЦІЯ СИНОПТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ ДЖЕНКІНСОНА-КОЛЛІСОНА

І. Г. Семенова[1,2]

[1]*Одеський державний екологічний університет,*
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна
[2]*Instituto Pirenaico de Ecología,*
Avda. Montañana, 1005, Zaragoza, Spain
in_home@ukr.net https://orcid.org/0000-0003-3383-4848

Територія України протягом року знаходиться під впливом різноманітних синоптичних процесів, які зазнають певної еволюції в умовах підстильної поверхні регіону і подекуди призводять до утворення несприятливих та небезпечних погодних умов. Класифікація синоптичних процесів дозволяє впорядкувати набір щоденних синоптичних ситуацій з урахуванням особливостей певного регіону як для їх використання при складанні прогнозів погоди, так й для дослідження динаміки регіональних синоптичних процесів в умовах зміни клімату. В даному дослідженні для класифікації синоптичних процесів на території України використовується модифікований метод Дженкінсона-Коллісона, який ґрунтується на використанні даних поля тиску біля поверхні землі та на ізобаричній поверхні 500 гПа. Аналіз отриманого набору щоденних типів циркуляції атмосфери за період 1948-2021 рр. та побудовані на його основі композитні поля тиску для кожного типу показали, що всі синоптичні ситуації чітко визначаються згідно з класифікацією та мають сезонні особливості повторюваності. Протягом року превалюють адвективні процеси західної групи, також часто спостерігається східна адвекція, причому цей тип циркуляції домінує у весняні місяці року. Процеси південної групи найбільш характерні для холодного періоду року. Антициклони частіше виникають над регіоном взимку та восени, а циклони – влітку та навесні. Залучення в класифікації даних поверхні 500 гПа дозволяє врахувати тривимірну структуру синоптичних об’єктів та виділити такі типи циркуляції як низькі циклони та антициклони, а також улоговини і відсічений циклогенез на висотах. Отримано, що низькі (термічні) циклони та антициклони становлять невелику частку синоптичних ситуацій, тому в роботі обговорюється доцільність подальшого включення їх в типізацію для території України. Досить рідкісними виявилися процеси, пов’язані з відсіканням циклону на верхніх рівнях, але через можливість утворення небезпечних погодних умов цей тип циркуляції є необхідним при класифікації регіональних синоптичних процесів.

Ключові слова: тип циркуляції; регіональний синоптичний процес; адвекція; синоптичний об’єкт; синоптична класифікація.

1 ВСТУП

Різноманітність синоптичних процесів окремих територій завжди викликала підвищену увагу фахівців в питаннях їх систематизації та використання у синоптичній практиці. Незважаючи на успіхи в покращенні чисельних прогнозів погоди з використанням глобальних та регіональних моделей циркуляції атмосфери, оцінка локальних атмосферних процесів та пов'язаних з ними умов погоди, як і раніше, залишається одним із завдань синоптичного аналізу. З іншого боку, прикладні дослідження, спрямовані на пошуки взаємодії характеру атмосферної циркуляції з просторовим розподілом та тенденціями метеорологічних величин, стихійних лих, екологічними проблемами тощо, вимагають певної систематизації атмосферних процесів на рівні окремих регіонів [1-3].

Сучасні чисельні підходи ґрунтуються на розробці об'єктивних методів класифікації атмосферних процесів, які адаптуються до будь-якого місця розташування, що забезпечується перевіреними критеріями та процедурами для оцінки типів циркуляції. Більшість ранніх класифікацій використовує опис структури приземних та висотних баричних полів, представлених у вигляді синоптичних карт (наприклад, класифікації Дзердзеєвського, Ванегенгейма-Гірса). Такі класифікації можуть доповнюватись іншими характеристиками (полем температури, опадів, вологості). У класифікації можуть бути враховані траєкторії баричних утворень та погодні умови на близьких

станціях.

Методи класифікації циркуляційних процесів бувають суб'єктивними, об'єктивними та змішаними (гібридними).

У суб'єктивних класифікаціях класи (типи) циркуляції визначаються суб'єктивно (вручну), і процес розподілення конкретних випадків до цих типів також проводиться суб'єктивно. Суб'єктивні методи, як правило, мають велику кількість типів, що прагнуть найбільш повно описати конкретну синоптичну ситуацію (наприклад, метод Хесса-Брезовського, 29 типів Grosswetterlagen [4]), або прив'язані до якогось географічного регіону, наприклад класифікація Кароссі [5], що враховує положення циклонів та антициклонів по відношенню до Карпатського регіону (13 типів).

Об'єктивні класифікації ґрунтуються на методах, в яких циркуляційні типи визначаються автоматизовано за допомогою чисельних процедур із використанням обчислювальної техніки. У таких класифікаціях застосовуються методи математичної статистики, наприклад, метод кластеризації та оптимізації, метод головних компонентів, кореляційний аналіз, нейромережі тощо [6]. У змішаних методах досягається деяка автоматизація процесу, коли для визначення типу циркуляції використовуються кількісні порогові значення чи передумови, які дозволяють автоматично присвоювати конкретній ситуації певний тип циркуляції. Прикладом такої класифікації може бути схема Schuepp, розроблена для Альпійського регіону [7], яка включає порогові значення деяких метеорологічних характеристик: градієнт приземного тиску та напрям вітру, вітер на рівні 500 гПа, вертикальний зсув вітру та інші параметри.

Огляду численних класифікацій циркуляційних процесів у Європі було присвячено п'ятирічний проект COST Action 733 «Harmonization and Application of Weather Type Classifications for European Regions», в якому проведено порівняльний аналіз 33 класифікацій (27 об'єктивних і 6 суб'єктивних), що дозволило створити набір каталогів циркуляції для 12 регіонів Європи та супутнє програмне забезпечення [8].

Однією з перших і відносно простих об'єктивних класифікацій була класифікація Дженкінсона і Коллісона [9], яка створювалася для відтворення більш ранньої суб'єктивної класифікації Лемба, розробленої для Британських островів, що враховує напрям потоку і кривизну ізобар на приземних картах [10]. Подальші дослідження показали універсальність методу Дженкінсона-Коллісона, причому його успішно використовували як у районах, що межують з морем [11-12], так і на континентальних просторах [13]. При цьому аналіз результатів для конкретних регіонів дозволив авторам узагальнити і поєднати деякі типи, оптимізувавши цим класифікацію для зони своїх географічних інтересів і скоротивши кількість типів циркуляції порівняно з великою суб'єктивною класифікацією (26 типів).

Одним із недоліків більшості регіональних класифікацій циркуляційних процесів є використання інформації лише приземних полів тиску, тоді як характер погоди конкретних територій формується під дією тривимірних тропосферних процесів. На це вказувалося, наприклад, у роботі Martín-Vide [14], де для Піренейського півострова показано, що саме приземні поля тиску слабко корелюють полями опадів, без урахування структури поля тиску середньої тропосфери. Тому включення в типізацію інформації з рівнів середньої тропосфери істотно розширює можливості більш детальної класифікації типів циркуляції з урахуванням вертикальної структури баричних утворень і стану тропосферних потоків. В дослідженні [15] було запропоновано об’єктивний метод класифікації синоптичних ситуацій над Європою та Північно-Східною Атлантикою, який ґрунтується на типах Grosswetterlagen (GWL) Хесса-Брезовського та використовує поля середнього тиску на рівні моря і геопотенціальної висоти 500 гПа. Як зазначається, об’єктивний підхід дозволив не тільки автоматизувати процедуру визначення типу циркуляції, але й значно розширив географічні межі застосування класифікації, адже класична класифікація Хесса-Брезовського розрахована перш за все, на типізацію синоптичних процесів Центральної Європи.

У нашому дослідженні для типізації синоптичних процесів над територією України було застосовано модифіковану класифікацію Дженкінсона-Коллісона з урахуванням структури поля тиску на рівні 500 гПа, яка вперше була запропонована у роботі Miró та ін. [16] для західного Середземномор'я та північного сходу Піренейського півострова. Метою дослідження є визначення повторюваності типів регіональної циркуляції атмосфери та їх відповідності реальними синоптичним процесам для адаптації цієї класифікації до умов України.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Класифікація Дженкінсона-Коллісона, яка традиційно включає 27 типів циркуляції, заснована на восьми змінних, що розраховуються виключно за даними приземного атмосферного тиску на 16 або 9 точковій схемі для всієї області розрахунку: середній тиск; зональна складова геострофічного вітру, розрахована як градієнт тиску між широтами; меридіональна складова геострофічного вітру, розрахована як градієнт тиску між відповідними довготами; напрямок вітру; швидкість вітру; зональна складова вихору швидкості; меридіональна складова вихору швидкості; вихор швидкості. Вибір більшої кількості вузлів сітки, як правило, зменшує кількість некласифікованих випадків, тому в даному дослідженні для території України обрано варіант 16-точкової схеми з кроком сітки 10 градусів (рис. 1). Центр розрахункової області розташований у центральній частині України. Особливістю застосовуваного комбінованого методу є те, що всі вузли сітки для рівня 500 гПа зміщені на захід на 5 градусів по відношенню до сітки на рівні поверхні землі. Такий підхід дозволяє врахувати типовий нахил просторової осі баричних утворень, а також такі структури, як висотні улоговини та гребені. Вісім змінних розраховуються за відповідними формулами з використанням тиску або геопотенціальної висоти у вузлах сітки та комбінуються у типи циркуляції відповідно до п'яти правил цієї методики, які наведені в статті [16].

Для визначення щоденних типів циркуляції на території України в період з 1 січня 1948 р. по 31 грудня 2021 р. було використано значення тиску на рівні моря та геопотенціальної висоти поверхні 500 гПа з реаналізу NCEP/NCAR-1 [17], за 12:00 UTC для 16-ти точок зазначеної вище схеми.

Базовий програмний R-код для розрахунку типів циркуляції було надано Піренейським інститутом екології (проф. S.M. Vicente-Serrano). Він дає змогу визначити 15 циркуляційних типів, адже до 13 типів комбінованої об'єктивної класифікації в розрахунок додано два типи із суб'єктивної класифікації Martín-Vide [18] для Піренейського півострова, які були об'єднані авторами з іншими типами циркуляції через їх невелику повторюваність.

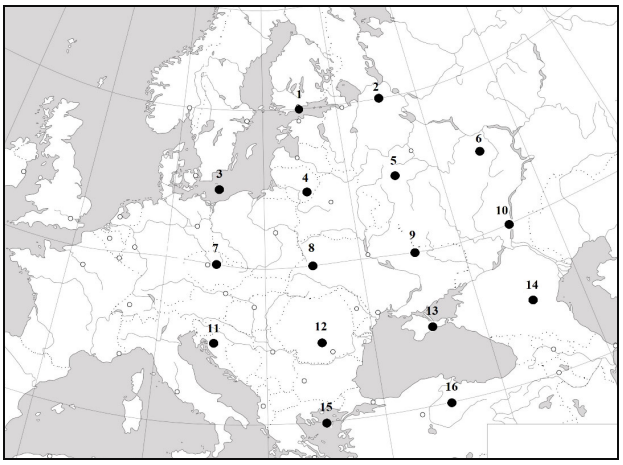


Рис. 1 - Схема розташування точок розрахункової сітки біля поверхні землі

Fig. 1 - Scheme of the grid location at the sea surface level

Йдеться про типи баричних утворень, механізм яких обумовлений термічним впливом підстильної поверхні. Тип "Термічний антициклон" (Thermal Anticyclone, TYPE_16) діагностується, коли біля поверхні землі в холодному повітрі формується область високого тиску із замкнутими ізобарами, а на висоті антициклон відсутній. Такі ситуації характерні для холодного періоду року при інтенсивному затоці холоду та стаціонуванні холодної повітряної маси в регіоні. Тип "Термічний циклон" (Thermal Low, TYPE_13), який характеризується неглибоким циклоном біля поверхні землі, що зникає з висотою, у програмному коді автоматично ділиться на два підтипи: "Термічний циклон" (Thermal Low) і "Неглибокий циклон" (Shallow cyclone). Оскільки для території Піренейського півострова термічні циклони характерні влітку при сильному прогріванні підстильної поверхні, назва цього типу автоматично присвоюється синоптичній ситуації в період року з травня по вересень. В інші місяці цьому ж об’єктивно визначеному типу ситуації присвоюється назва «Неглибокий циклон», що також означає присутність циклону тільки біля поверхні землі, але його механізм виникнення не зумовлений повністю термічним фактором. Для території України ці типи циркуляції також було визначено та проаналізовано для доцільності їх подальшого виділення як окремих класів.

У табл. 1 представлена інформація про всі типи комбінованої класифікації, що використовується в даному дослідженні. Слід зазначити, що конфігурація ізобар/ізогіпс оцінюється над районом дослідження, що охоплюється вузлами розрахункової сітки.

Таблиця 1 – Типи циркуляції за модифікованою класифікацією Дженкінсона-Коллісона (TYPE_s_) [16] та класифікацією Martín-Vide (TYPE_) [18]

Table 1 – Circulation types according to the modified Jenkinson-Collison classification (TYPE_s_) [16] and the Martín-Vide classification (TYPE_) [18]

Тип циркуляції	Оригінальна назва	Інтерпретація
TYPE_s_01	West advection	*Західна адвекція*. Напрямок ізобар біля поверхні землі та ізогіпс на рівні 500 гПа відповідає західним вітрам
TYPE_s_02	Anticyclonic western advection	*Антициклонічна західна адвекція*. Розташування антициклону біля поверхні землі та конфігурація ізогіпс на рівні 500 гПа спрямована відповідає утворенню західних вітрів
TYPE_s_03	Northwest advection	*Північно-західна адвекція*. Напрямок ізобар біля поверхні землі та ізогіпс на рівні 500 гПа відповідають північно-західним вітрам
TYPE_s_04	North advection	*Північна адвекція*. Напрямок ізобар біля поверхні землі та ізогіпс на рівні 500 гПа відповідають північним вітрам
TYPE_s_05	Northeast advection	*Північно-східна адвекція*. Напрямок ізобар біля поверхні землі та ізогіпс на рівні 500 гПа відповідають північно-східним вітрам
TYPE_s_06	East advection	*Східна адвекція*. Напрямок ізобар у поверхні землі відповідає східним вітрам, тоді на рівні 500 гПа присутній висотний гребінь або зона східних вітрів
TYPE_s_07	East Advection with cut-off low above	*Східна адвекція з відсіченим верхнім циклоном*. Напрямок ізобар у поверхні землі відповідає східним вітрам, тоді на рівні 500 гПа присутній висотний циклон або улоговина
TYPE_s_08	South advection	*Південна адвекція*. Напрямок ізобар біля поверхні землі та ізогіпс на рівні 500 гПа відповідають південним вітрам
TYPE_s_09	Southwest advection	*Південно-західна адвекція*. Напрямок ізобар біля поверхні землі та ізогіпс на рівні 500 гПа відповідають південно-західним вітрам
TYPE_s_10	Trough	*Улоговина*. Улоговина, що перетинає район дослідження із заходу на схід, без визначеного центру
TYPE_s_11	Low or Cyclone	*Циклон*. Циклон із замкненими ізобарами/ізогіпсами присутній біля поверхні землі та на рівні 500 гПа
TYPE_s_12	Shallow Cyclone or Undetermined pressure gradient	*Неглибокий циклон*. Неглибокий циклон біля поверхні землі, який зникає з висотою, або малоградієнтне поле тиску; на рівні 500 гПа малоградієнтне поле тиску або висотний гребінь
TYPE_s_13	Anticyclone	*Антициклон*. Антициклон із замкненими ізобарами / ізогіпсами, присутній біля поверхні землі та на рівні 500 гПа
TYPE_13	Thermal Low	*Термічний циклон*. Неглибокий циклон біля поверхні землі, який зникає з висотою; на рівні 500 гПа малограградієнтне поле або адвективний тип. Цей тип більш характерний для літніх місяців
TYPE_16	Thermal anticyclone	*Термічний антициклон*. Приземний антициклон утворюється в холодній повітряній масі, що стаціонує; на рівні 500 гПа може спостерігатися малоградієнтна улоговина або адвективний тип. Цей тип більш характерний для зимових місяців

Як можна бачити, всі типи циркуляції поділяються на три основні групи: 1) адвективне перенесення, що відповідає певному напрямку вітрів біля поверхні землі та на висотах у районі дослідження; 2) циклон, що відповідає циклонічній циркуляції біля поверхні землі, при різних ситуаціях на висотах; 3) антициклон, що відповідає антициклонічній циркуляції біля поверхні землі, при різних ситуаціях на висотах.

3 РЕЗУЛЬТАТИ

3.1 Типи циркуляції

Розглянемо, як розподілилися щоденні поля тиску за період 1948-2021 рр. за типами циркуляції і їх візуалізацію для кожного типу. В табл. 2 представлені композитні поля тиску біля поверхні землі та рівня 500 гПа для обчислених типів циркуляції (ТЦ). Результати можна поєднати у шість груп типів циркуляції, які об'єднує характер баричного поля та напрямок переносу (адвекції) у поверхні землі: 1) антициклонічна (типи 1ТЦ, 2ТЦ); 2) циклонічна (типи 4ТЦ, 5 (з) та 5(л) ТЦ, 6ТЦ); 3) східна (типи 7ТЦ, 8ТЦ); 4) північна (типи 9ТЦ, 10ТЦ, 11ТЦ); 5) південна (типи 12ТЦ, 13 ТЦ); 6) західна (типи 3ТЦ, 14ТЦ). Далі наведемо короткий опис кожного з типів циркуляції з розглядом особливостей на прикладах фактичних полів тиску, які наведені на рис. 2 для зимового та літнього періодів і обрані з отриманих наборів дат по кожному з типів циркуляції.

1ТЦ (Антициклон): біля поверхні землі антициклон розташований над Східною та Центральною Європою з основним центром над Україною або північніше (див. табл. 2, 1ТЦ). У зимовий період антициклон, зазвичай, більш потужний, ніж влітку (рис. 2, 1ТЦ). У висотному полі тиску територія України у південній та східній частині знаходиться під впливом висотної улоговини, орієнтованої з північного сходу. Західна та північна частини країни знаходяться в області потужного висотного гребеня, орієнтованого з центрального Середземномор'я на Прибалтику.

2ТЦ (Термічний антициклон): біля поверхні землі антициклон розташовується над Східною та Центральною Європою з основним центром над Україною (див. табл. 2, 2ТЦ). Тиск у центрі в середньому нижче, ніж у типі 1ТЦ. У фактичних ситуаціях антициклон може бути представленим полем підвищеного тиску з окремими центрами, які підсилюються або слабшають в залежності від часу доби та термічного впливу підстильної поверхні (рис. 2, 2ТЦ). У висотному полі тиску територія України повністю знаходиться в області висотної улоговини, орієнтованої з північного сходу. Висотний гребінь займає центральну Європу та орієнтований із південного заходу Європи на Балтійське море.

3ТЦ (Західна адвекція): в приземному та висотному полі тиску циркуляція атмосфери над Європою характеризується наявністю обширного поля низького тиску або циклону (біля поверхні землі) у високих широтах, та полем підвищеного тиску у південній половині Європи з максимальним тиском над західним Середземномор'ям (див. табл. 2, 3ЦТ). Даний тип, як правило, супроводжується активною циклонічною діяльністю над північчю Європи і прилеглими морями як у зимовий, так і літній періоди, при цьому територія України може періодично підпадати під вплив глибоких улоговин та атмосферних фронтів, пов'язаних з цими циклонами (рис. 2, 3ЦТ). У смузі широт 45-55^{o} півн.ш. є зона західних вітрів практично над усім континентом, зокрема над Україною.

4ТЦ (Циклон): біля поверхні землі над територією України розташовується великий циклон із замкнутими ізобарами (табл. 2, 4ТЦ). Улоговина циклону може поширюватися на Балканський та Апеннінський півострів. Циклон обмежений гребенем зі сходу або півночі (рис. 2, 4ТЦ). Висотний циклон знаходиться на захід від приземного центру, інтенсивна висотна фронтальна зона (ВФЗ) зсунута на південь і проходить через райони Середземного та Чорного морів.

5(з) і 5(л) ТЦ (Низький циклон (зима) та термічний циклон (літо)): біля поверхні землі циклон розташовується над територією України, улоговина циклону витягнута на захід, з частинним центром над Апеннінським півостровом (табл. 2, 5ТЦ). Циклон обмежений зі сходу та півночі антициклоном і його гребенем. Літній і зимовий типи, переважно, відрізняються глибиною циклонів біля поверхні землі. У фактичних синоптичних ситуаціях над територією України можуть розташовуватися периферійні частини циклону, а не його центр, як у типі 4ТЦ (рис. 2, 5ТЦ). У висотному полі спостерігається квазізональне перенесення зі слабо вираженою улоговиною над центральною Європою та західною половиною Середземного моря.

Таблиця 2 – Типи циркуляції та композитні поля тиску на рівні моря та геопотенціальної висоти поверхні 500 гПа
Table 2 – Circulation types and composite fields of sea level pressure and geopotential height at the 500 hPa level

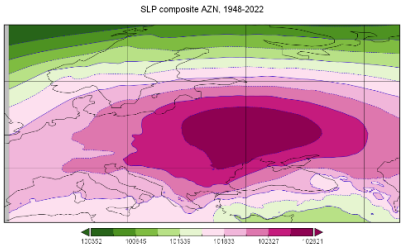
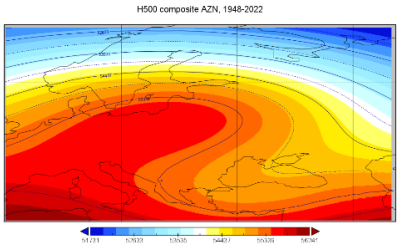
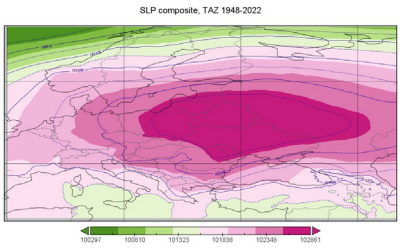
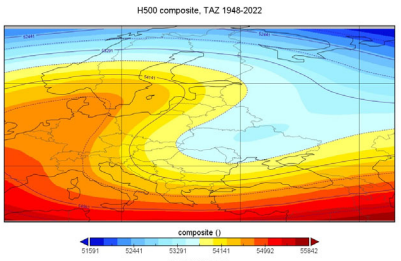
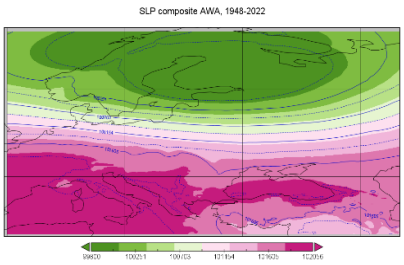
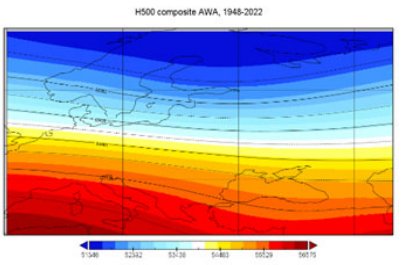
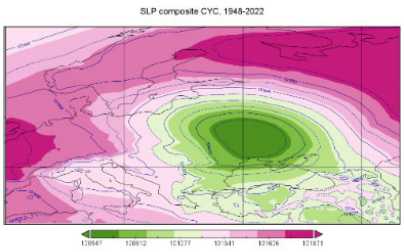
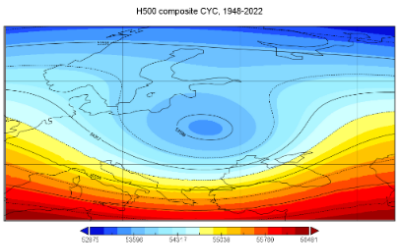
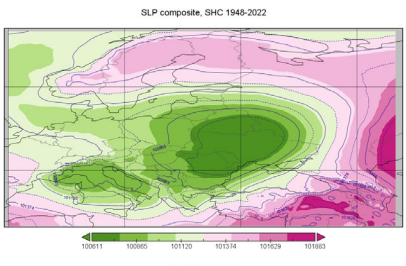
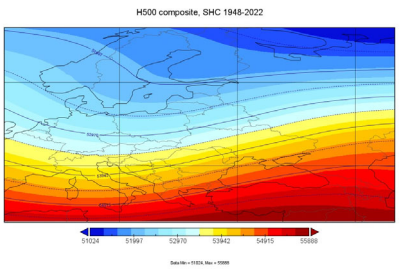
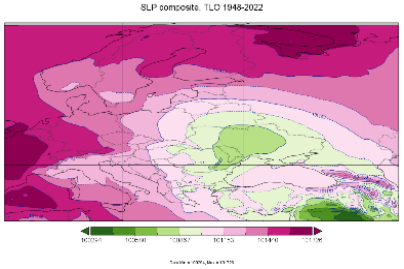
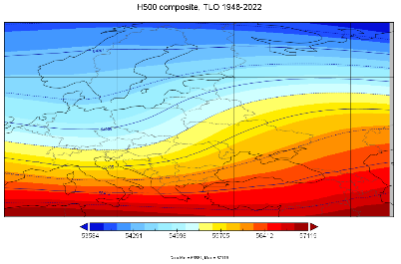
ТЦ	Повна назва ТЦ	Приземне поле	АТ-500
1ТЦ	Антициклон		
2ТЦ	Низький (термічний) антициклон		
3ТЦ	Західна адвекція		
4ТЦ	Циклон		
5(з)ТЦ	Низький циклон		
5(л)ТЦ	Термічний циклон		

Табл. 2 – Продовження
Table 2 – Continued

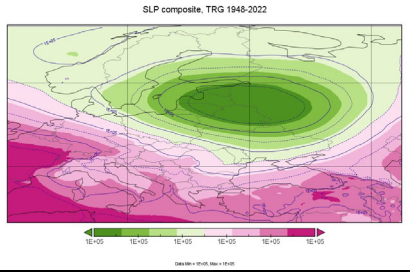
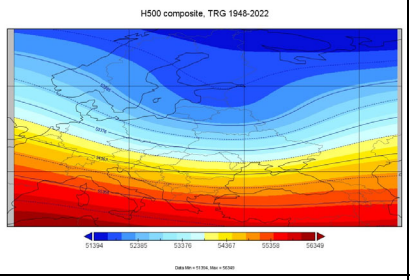
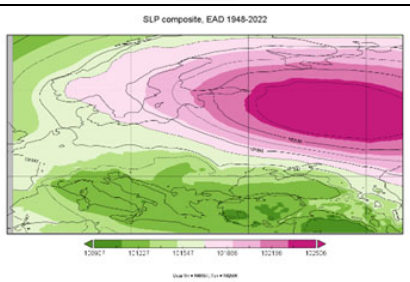
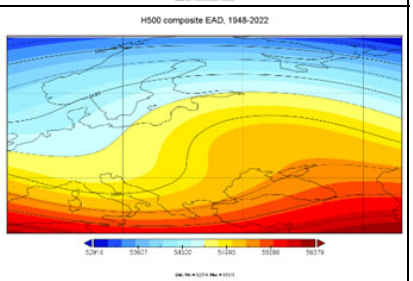
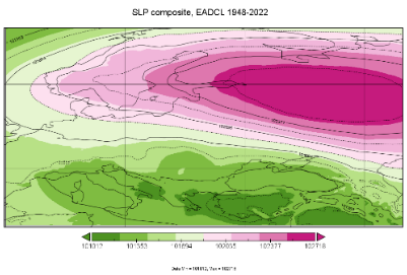
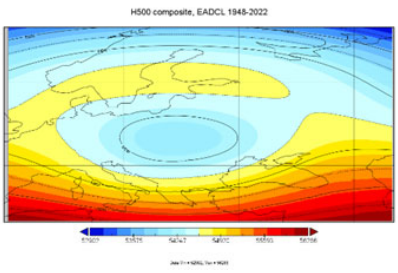
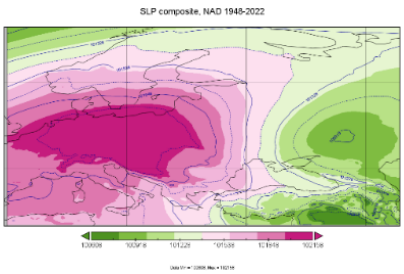
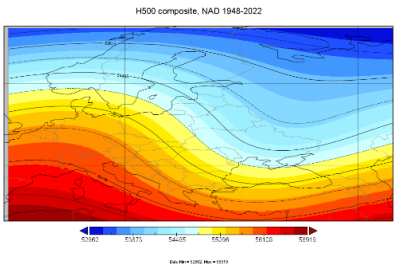
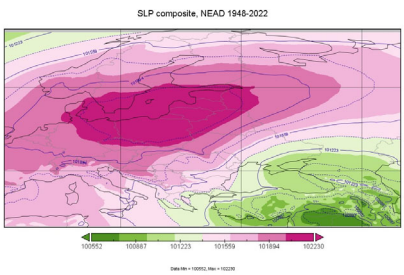
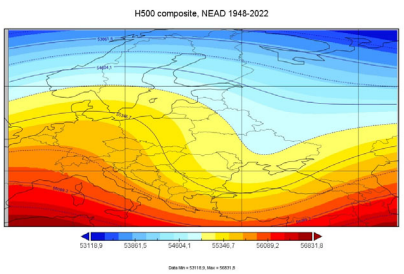
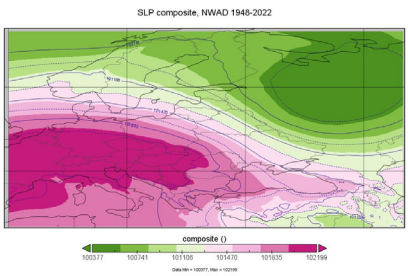
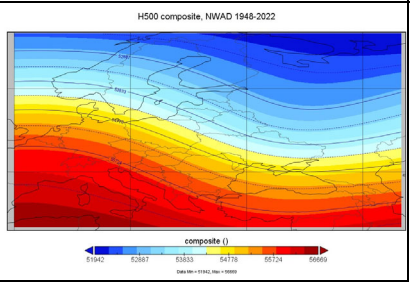
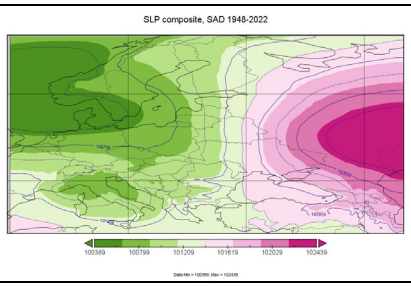
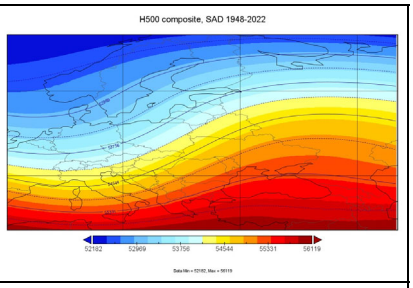
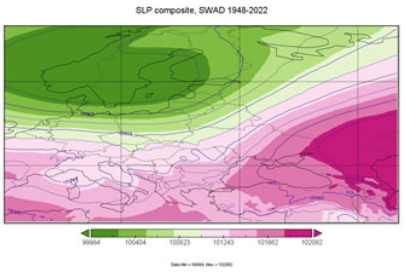
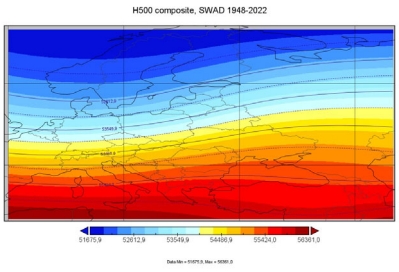
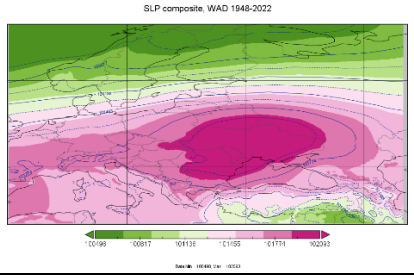
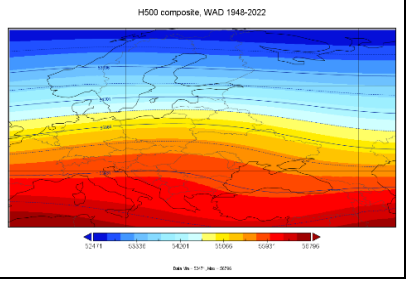
6ТЦ	Улоговина		
7ТЦ	Східна адвекція		
8ТЦ	Східна адвекція з відсіченим верхнім циклоном		
9ТЦ	Північна адвекція		
10ТЦ	Північно-східна адвекція		
11ТЦ	Північно-західна адвекція		

Табл. 2 – Продовження
Table 2 – Continued

12ТЦ	Південна адвекція		
13ТЦ	Південно-західна адвекція		
14 ТЦ	Антициклонічна західна адвекція		

При цьому висотний гребінь над територією України більш розвинений у теплий період, а улоговина над Європою – у холодний період року. Поділ типу 5ТЦ на низький та термічний циклон за формальною ознакою – порою року, виявляється недоцільним для території України, оскільки навіть у літній час циклонічні малоградієнтні поля можуть містити атмосферні фронти (див. рис. 2, 5ТЦ), тоді як термічні утворення, за визначенням, нефронтальні та їх поява повністю зумовлена термодинамічними умовами в приземному шарі повітря.

6ТЦ (Улоговина): приземне поле тиску характеризується обширним циклоном із центром над районами Прибалтики та Білорусі, причому на територію України з півночі орієнтована широка улоговина цього циклону (табл. 2, 6ТЦ). Південні райони Європи перебувають у полі високого тиску, пов'язаного з антициклоном (гребенем) із заходу. У глибоких улоговинах над територією України часто проходять атмосферні фронти (рис. 2, 6ТЦ). У висотному полі область низького тиску розташовується у високих та полярних широтах, високий тиск – у південній половині Європи та над Середземним морем. Територія України знаходиться під впливом висотної улоговини, орієнтованої з півночі.

7ТЦ (Східна адвекція): біля поверхні землі потужний антициклон розташовується над Східноєвропейською рівниною, гребінь його поширюється на райони Скандинавії. Територія України знаходиться в умовах південної периферії антициклону, в зоні вітрів східної чверті (табл. 2, 7ТЦ). Цей тип, зазвичай, пов'язані з активізацією циклонічної діяльності над Чорним морем і Малою Азією, особливо у зимовий період (рис. 2, 7ТЦ). У висотному полі тиску над Україною спостерігається добре розвинений висотний гребінь, орієнтований з Малої Азії на Прибалтику.

8ТЦ (Східна адвекція з відсіченим верхнім циклоном): біля поверхні землі обширний антициклон розташовується над Східноєвропейською рівниною, гребінь його поширюється на райони Скандинавії (табл. 2, 8ТЦ). Територія України знаходиться в умовах південної периферії антициклону, у області вітрів східної чверті. У літній період над Україною може бути малоградієнтне поле тиску,

взимку воно зміщене на південь, на Чорне море (рис. 2, 8ТЦ). У висотному полі тиску над центральною та східною Європою розташовується висотний циклон, відсічений із півночі смугою підвищеного тиску.

Цей тип має загальні риси в приземному полі тиску з типом 7ТЦ, проте структура висотного поля з осередком холоду у висотному циклоні свідчить про нестійкі термодинамічні умови атмосфери, особливо в літній період.

9ТЦ (Північна адвекція): в приземному полі тиску над західною та центральною Європою розташовується потужний антициклон, над південним сходом Східноєвропейської рівнини та Прикаспієм - глибокий циклон (табл. 2, 9ТЦ). Територія України розташована у перехідній зоні між антициклоном на заході та циклоном на сході, в області вітрів північної чверті. Градієнти тиску в перехідній зоні можуть бути великими як у зимовий, так і в літній період, і спостерігаються часто за холодним фронтом (рис. 2, 9ТЦ). У висотному полі тиску висотний гребінь, орієнтований із північного заходу Африки, займає західну та центральну Європу. Висотна улоговина над східною Європою проходить через територію України.

10ТЦ (Північно-східна адвекція): в приземному полі тиску потужний антициклон розташовується над усією Європою, з центром над Прибалтикою та півднем Балтійського моря (табл. 2, 10ТЦ). Територія України знаходиться на південно-східній периферії цього антициклону, у зоні північно-східних вітрів. Над сходом Чорного моря та Кавказом у холодний період року активізується циклонічна діяльність (див. рис. 2, 10ТЦ). У висотному полі тиску висотний гребінь, орієнтований із північного заходу Африки, займає західну та центральну Європу. Вузька (порівняно з типом 9ТЦ) висотна улоговина розташована над Україною.

11ТЦ (Північно-західна адвекція): в приземному полі тиску антициклон розташовується над Західною та Центральною Європою, не поширюючись на Скандинавію. Поле низького тиску займає північну половину Східноєвропейської рівнини (див. табл. 2, 11ТЦ). Західна половина території України та Чорне море знаходяться в області гребня антициклону, тоді як північний схід країни – в області улоговини. Над територією України проходить зона північно-західних вітрів (див. рис. 2, 11 СТ). Висотне поле тиску має слабко виражену меридіональність потоків за рахунок висотного гребня, орієнтованого з півночі Африки на західну Європу. Над Східною Європою відмічається північно-західне перенесення у передній частині висотного гребеня.

12ТЦ (Південна адвекція): південні потоки біля поверхні землі над Україною формуються за рахунок взаємодії потужного антициклону над півднем Східноєвропейської рівнини та полем зниженого тиску над західною та центральною Європою з основним центром над Північним морем (див. табл. 2, 12ТЦ). Сильний південний потік в холодний період може спостерігатися у східній частині так званого центрального циклону над Європою, коли його периферія з частинними циклонами проходить через територію України (див. рис. 2, 12ТЦ). Влітку південне перенесення частіше зумовлює західна периферія гребня зі сходу. На висотах над Україною знаходиться західна периферія висотного гребня, орієнтованого з районів Малої Азії на Чорне море та Кавказ, що забезпечує південно-західні потоки в тропосфері. Над Західною та Центральною Європою спостерігається квазізональне перенесення.

13ТЦ (Південно-західна адвекція): приземне поле тиску характеризується наявністю обширного антициклону над Каспійським морем та глибоким циклоном над Скандинавією (див. табл. 2, 13ТЦ). Поле підвищеного тиску також знаходиться над Середземномор'ям. Над Україною у перехідній зоні між циклоном та антициклоном спостерігаються південно-західні потоки (див. рис. 2, 13ТЦ). На висотах слабо виражений гребінь відмічається над районами Кавказу та Каспійським морем, над Україною потоки західного та південно-західного напрямку. Над Західною та Центральною Європою спостерігається квазізональне перенесення.

14ТЦ (Антициклонічна західна адвекція): біля поверхні землі широка смуга високого тиску розташована в помірних широтах, з окремими центрами над південною половиною Східної Європи (див. табл. 2, 14ТЦ). Активна циклонічна діяльність зсунута над континентом у високі широти та/або зосереджена в Північній Атлантиці (див. рис. 2, 14ТЦ). В висотному полі тиску переважає західний перенос над усім Європейським континентом. Даний тип має спільні риси у структурі приземного поля тиску з типами 1ТЦ та 2ТЦ, але на висотах його відрізняє яскраво виражена зональність атмосферної циркуляції. Сенс розділення цього типу з типом 3ЦТ полягає у наявності чіткого процесу розповсюдження гребня або антициклону із заходу на схід.

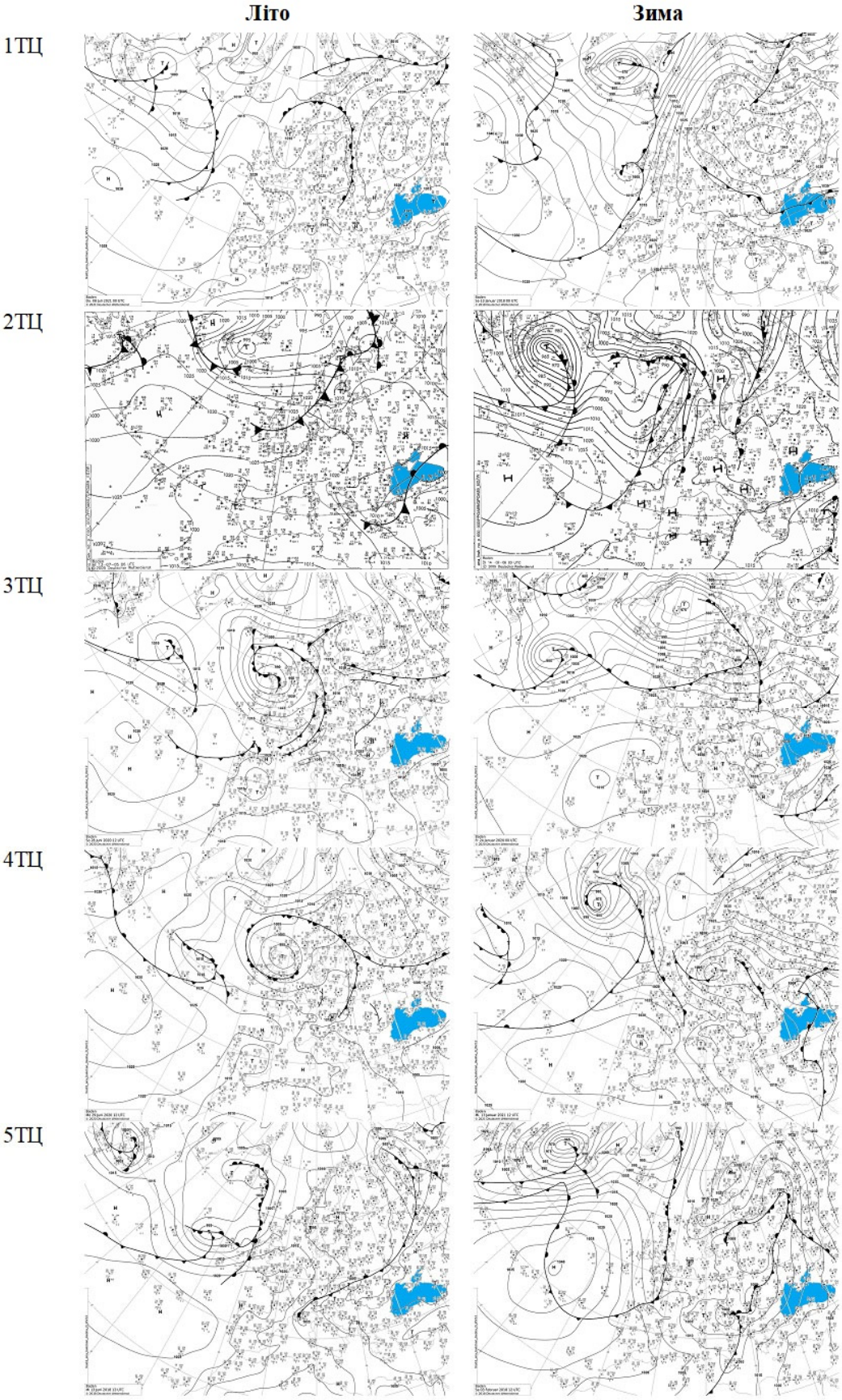


Рис. 2 - Приклади синоптичних ситуацій для 14 типів циркуляції (згідно табл. 2) взимку та влітку
Fig. 2 - Examples of weather patterns for 14 circulation types (regarding Table 2) in winter and summer

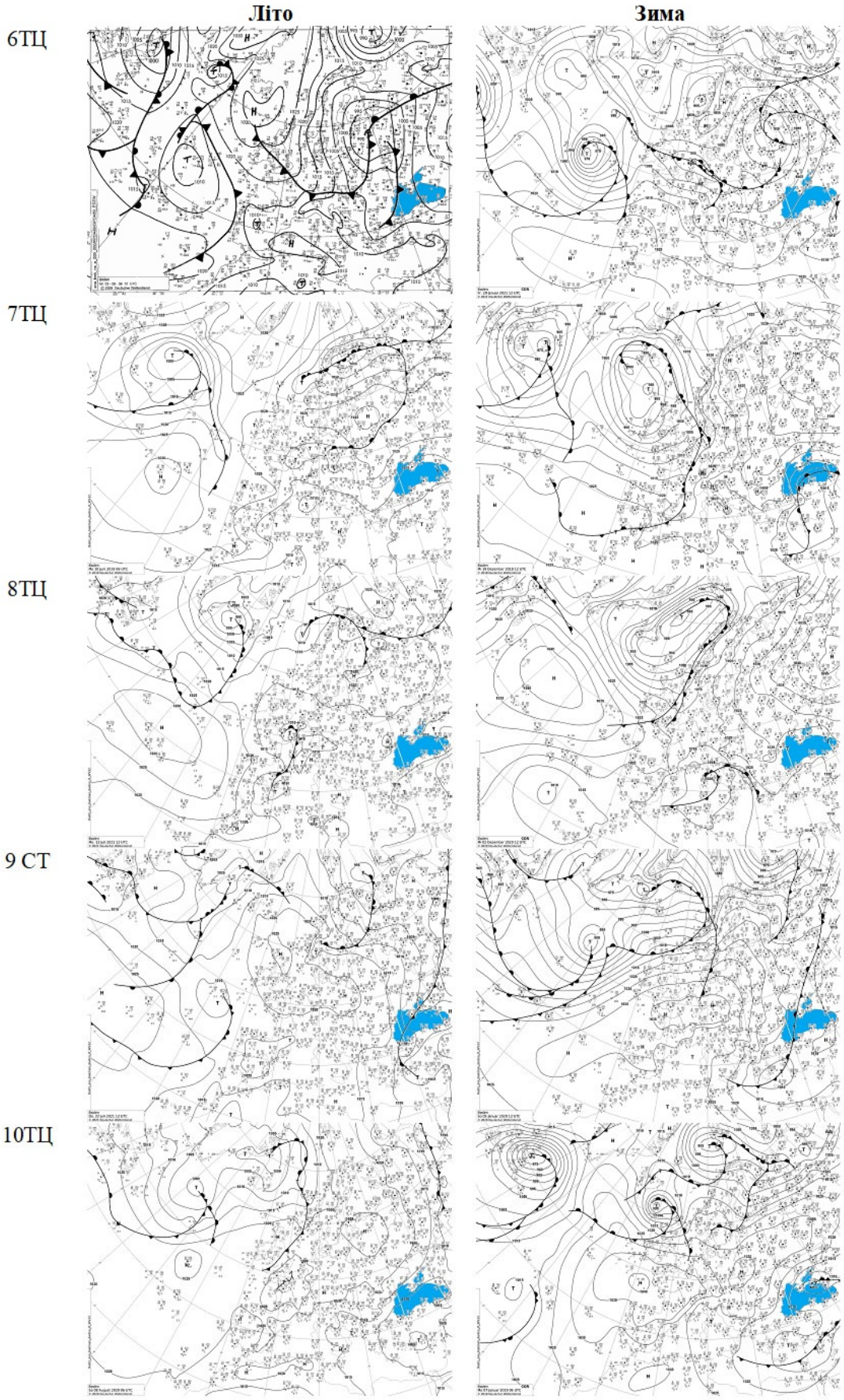


Рис. 2 – Продовження
Fig. 2 – Continued

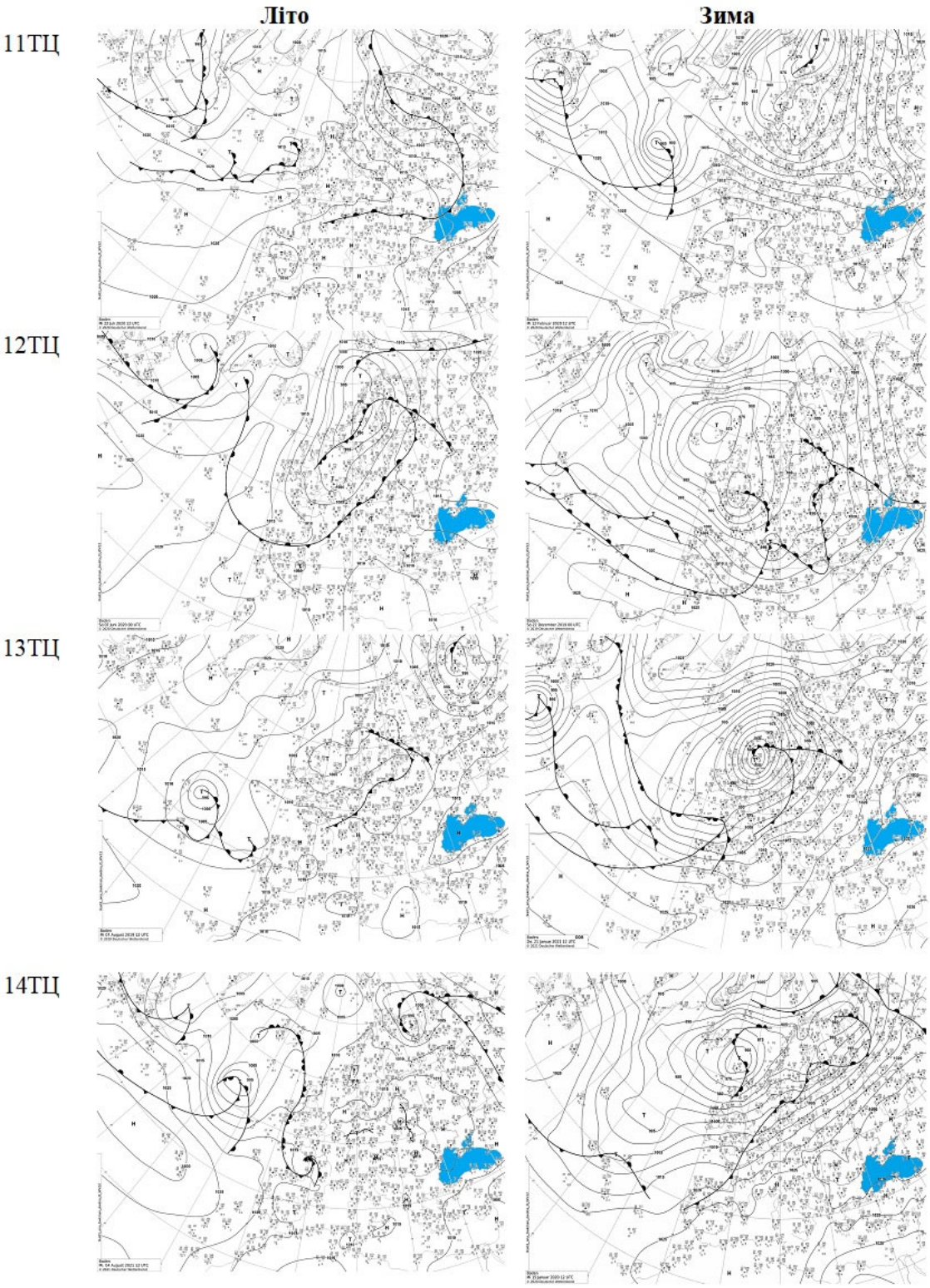


Рис. 2 – Продовження
Fig. 2 – Continued

3.2 Повторюваність типів циркуляції

Огляд синоптичних процесів при визначених типах циркуляції показав, що, загалом, вони охоплюють всю різноманітність атмосферних процесів, які протікають над Східною Європою та Україною, зокрема. Як вже вказано вище, для території України є доцільним об'єднання типів «Низький циклон» та «Термічний циклон», тому в подальшому аналізі повторюваності типів циркуляції обидва типи будуть розглянуті як один тип 5ТЦ під назвою «Низький циклон».

Аналіз річної повторюваності типів циркуляції показав, що найбільш повторюваними (12-13 %) є типи 7ТЦ (східна адвекція) та 14ТЦ (антициклонічна західна адвекція) (рис. 3, а). Досить часто (10-11 %) зустрічаються синоптичні ситуації з типом 3ТЦ (західна адвекція) та 11ТЦ (північно-західна адвекція). Повторюваність адвективних процесів південної групи (12ТЦ, 13ТЦ) становить 8-9 %. Відносно низьку повторюваність мають процеси антициклогенезу (1ТЦ, 2ТЦ) та циклогенезу (4ТЦ, 5ТЦ) над Україною, при цьому низький (термічний) антициклон зустрічається всього у 0,2 % всіх випадків, що вказує на можливість поєднання цього типу з типом циркуляції 1ТЦ.

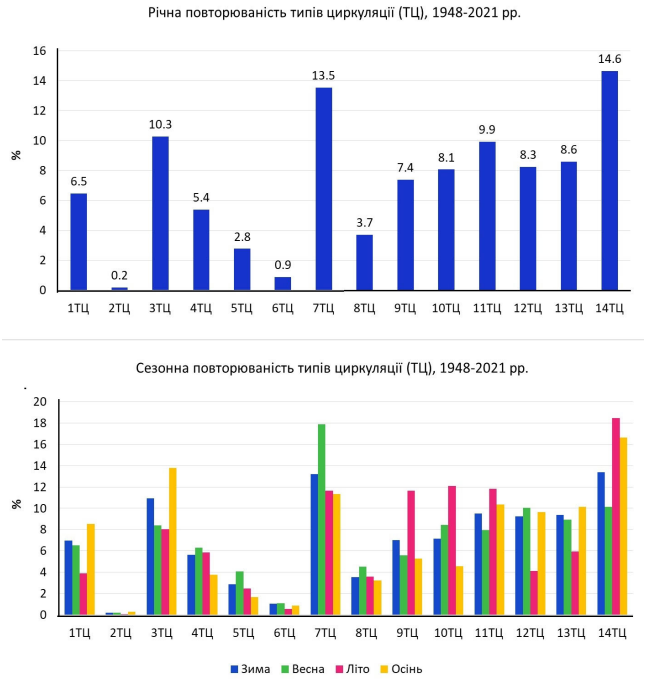


Рис. 3. Повторюваність типів циркуляції за період 1948-2021 рр.: а) річна та б) сезонна
Fig. 3. Frequency of circulation types for the period 1948-2021: a) annual and b) seasonal

Повторюваність 1 % мають також улоговини (тип 6ТЦ), але, з огляду на важливість цих баричних структур, з якими пов'язані атмосферні фронти, цей тип доречно розглядати окремо, не поєднуючи з іншими типами циклонічної групи. Досить рідкісними (близько 4 %), через механізм їх утворення, є процеси, пов'язані з відсіканням циклону на верхніх рівнях (тип 8ТЦ), але складні погодні умови, які можуть відповідати цій синоптичній ситуації [19] і той факт, що Східна Європа є одним з районів північної півкулі з найбільшою повторюваністю цих об'єктів [20, 21], дозволить розглядати цей тип циркуляції окремо.

В сезонному розподілі загалом, лідирують ті самі типи циркуляції, що й в річному. Але в різних сезонах відмічається відносне збільшення повторюваності інших типів (рис. 3, б). Так, східна адвекція (7ТЦ) переважає навесні, західна адвекція (3ТЦ) – взимку, а антициклонічна західна адвекція (14ТЦ) - влітку та восени. Другими за повторюваністю влітку йдуть процеси північної групи та східна адвекція (7ТЦ). Восени, другим за повторюваністю є тип 3ТЦ, що вкупі з типом 14ТЦ відповідає процесам найбільшого розвитку і розповсюдження на схід азорського антициклону в цей сезон [22]. Влітку сумарний відсоток повторюваності процесів північної групи (9, 10, 11ТЦ) становить понад третину усіх процесів (36 %). Процеси південної групи в усі сезони року, крім літа, мають повторюваність 8-11 %. Максимум повторюваності антициклонів припадає на зиму та осінь (близько 8 %), а циклонів – на весну та літо (близько 6 %). Далі розглянемо, як розподіляється повторюваність типів циркуляції по місяцях року (рис. 4).

Взимку (рис. 4, а) спостерігається домінування західної адвекції (3ТЦ) в січні та грудні (близько 16 %), та східної адвекції (7ТЦ) у лютому (близько 14 %). В грудні близько 13 % становлять процеси південно-західної адвекції (13ТЦ). Високу одноманітну повторюваність (11 %) в усі зимові місяці має північно-західна адвекція (11ТЦ). Повторюваність 8-10 % мають процеси південної групи і антициклони.

Навесні (рис. 4, б) східна адвекція (7ТЦ) найчастіше спостерігається в квітні і травні (близько 20 %). Поряд з тим типом, що привалює, в березні порівняно високу повторюваність (11-13 %) має західна адвекція (3ТЦ), в квітні – південна адвекція (12ТЦ), а в травні – північно-східна адвекція (10ТЦ). Майже однакову повторюваність в усі весняні місяці мають типи 14ТЦ та 13ТЦ (8-10 %).

Влітку (рис. 4, в) в усі місяці превалюють

процеси антициклонічної західної адвекції (14ТЦ) з максимумом повторюваності у серпні (23 %). В межах 10-12 % в усі місяці літа коливається повторюваність процесів східної, північно-східної та північно-західної адвекції (7ТЦ, 10ТЦ та 11ТЦ відповідно). В липні, другими за повторюваністю (14 %) після типу 14ТЦ йдуть процеси північної адвекції (9ТЦ) та північно-західної адвекції (11ТЦ). Низьку повторюваність мають процеси південної групи та відсіченого циклогенезу.

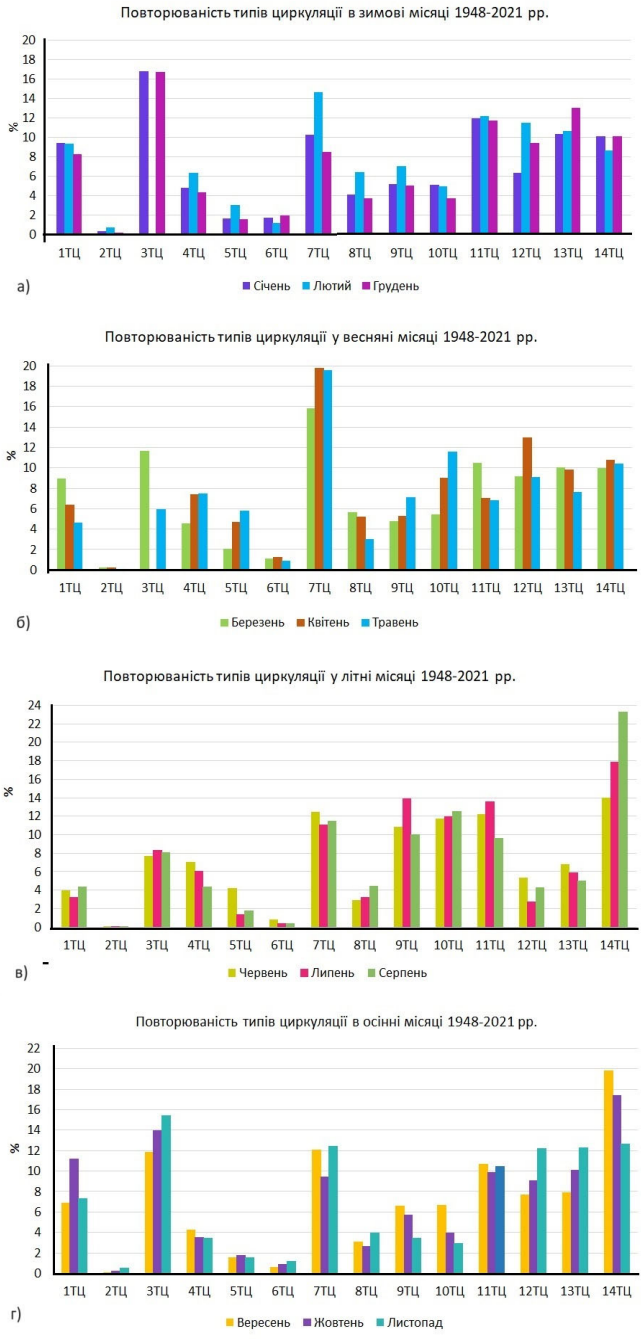


Рис. 4 - Повторюваність типів циркуляції по місяцям періоду 1948-2021 рр.: а) взимку; б) весною; в) влітку; г) восени

Fig. 4 - Frequency of circulation types by months for the period 1948-2021 in: a) winter; b) spring; c) summer; d) autumn

Восени (рис. 4, г), як і влітку, домінуючими є процеси антициклонічної західної адвекції (14ТЦ) з максимумом повторюваності близько 20 % у вересні. На другому місці за повторюваністю у вересні та жовтні йде західна адвекція (3ТЦ), і в листопаді вона стає превалюючим типом (16 %). У вересні та листопаді досить високу повторюваність (12 %) мають процеси східної адвекції (7ТЦ), а в листопаді такої ж повторюваності набувають процеси південної групи (12 та 13ТЦ), що пов'язано з активізацією південних циклонів. Процеси північної групи, навпаки, мають невелику повторюваність.

4 ОБГОВОРЕННЯ

Експериментальний розрахунок типів циркуляції за модифікованим методом Дженкінсона-Коллісона показав, що в усі дні процеси були класифіковані, тобто віднесені до одного з 15 типів циркуляції, які були запропоновані в даному методі при його розробці для території Іспанії (а саме, півночі Каталонії). Аналіз повторюваності типів циркуляції визначив, що деякі типи мають дуже низьку повторюваність, тому для подальшого пристосування цієї класифікації для типізації регіональних синоптичних процесів України, необхідно визначити доцільність обліку таких типів. Найбільш низьку повторюваність має тип 2ТЦ (Термічний антициклон). В дослідженні для території Іспанії цей тип був уведений для врахування зимових процесів локалізації холодної повітряної маси в передгір'ях Піренеїв та утворення в них низьких термічних антициклонів. Як доводить отримана в нашому дослідженні низька повторюваність типу 2ТЦ, заповнені холодом в приземних шарах повітря антициклони досить нечасто зберігають свою термічну однорідність протягом тривалих періодів часу, щоб бути зафіксованими як окремий тип в умовах території України, яка звичайно знаходиться під впливом інтенсивної адвекції різних напрямків в холодний період року. В теплий період можливо утворення місцевих низьких антициклонів в нічні години при радіаційному вихолоджуванні підстильної поверхні і прилеглого шару повітря, але, як правило, вдень такі антициклони руйнуються, залишаючи поле підвищеного тиску [22]. Тобто, використані в роботі дані реаналізу за 12:00 UTC не дають змоги отримати інформацію про такі випадки. Загалом, даний тип 2ТЦ може бути об'єднаний з основним типом 1ТЦ (антициклон),

адже антициклони є низькими холодними утвореннями не тільки термічного походження, але й на перших стадіях розвитку фронтального антициклону. Тому об'єднання двох типів в деякій мірі, дає змогу врахувати еволюцію антициклону, яка відбуватиметься безпосередньо над територією України.

Низьку повторюваність має також тип 6ТЦ (улоговина), і, в загальному випадку, для спрощення аналізу синоптичних процесів, його можна поєднати з типом 5ТЦ (низький циклон), від якого улоговину відрізняє тільки відсутність замкненого центру біля поверхні землі. До того ж, типізація не визначає глибину улоговин, яка відіграє суттєву роль в інтенсивності конвергенції потоків та активності атмосферного фронту, пов'язаного з улоговиною. Але, для дослідження саме улоговин і, можливо, подальшої їх типізації, наприклад, за характером географічної орієнтації і розповсюдження в межах України, цей тип доречно виділяти окремо. Слід зауважити, що повторюваність типу 6ТЦ залежить від сезону року, і взимку повторюваність становить близько 2 % (див. рис. 4, а), а це є третина від повторюваності циклонів (тип 4ТЦ) в цей сезон. Тобто, в групі, пов'язаній з циклогенезом, улоговини відіграють значну роль і можуть розглядатися окремо, принаймні, в холодний період року.

Отримані в даному дослідженні результати стосовно повторюваності основних типів циркуляції в Східній та Центральній Європі, в цілому, збігаються з тими, що показані в роботах із застосуванням інших класифікацій. Так, в роботі [23] розглянуто повторюваність типів циркуляції з використанням об'єктивної класифікації Хесса-Брезовського (каталог GWL) для території Європи. Аналіз типів циркуляції за каталогом показав, що превалює тип 1 (Західні вітри, що дмуть в антициклонічному полі), високу повторюваність також має тип 4 (Поле підвищеного тиску по всій Центральній Європі), а циклонічне поле (тип 5) зустрічається доволі нечасто в усі сезони року. Крім того, як показано в дослідженні [24], взимку в останні декілька десятиліть (1981–2010 рр.) спостерігалася тенденція до збільшення повторюваності типів циркуляції із західними вітрами, переважно за рахунок зменшення східних вітрів, що сприяло підвищенню температури вглибині континенту. В той же час, навесні та влітку збільшувалася частота антициклонічних ситуацій над континентом, за яких спостерігається адвекція теплих повітряних мас в Центральну Європу.

На відміну від класифікації Хесса-Брезовського, типи циркуляції в модифікованій класифікації Дженкінсона-Коллісона не мають жорсткої прив'язки до території дослідження, що дозволяє описувати синоптичні ситуації в будь-якому регіоні. Завдяки цьому, об'єктивна класифікація Дженкінсона-Коллісона, переважно в оригінальному вигляді, тобто з використанням лише приземного поля тиску, широко застосовується для оцінки впливу синоптичних процесів на формування погодних умов в конкретному регіоні. Так, в роботі [25] ця класифікація дозволила визначити основні синоптичні процеси спекотного літа 2022 р. в Західній Європі, які призвели до виникнення екстремально високих температур повітря, та оцінити майбутні перспективи появи цих процесів на основі даних кліматичного моделювання. Дослідження Donat та ін. [26] для Центральної Європи показали, за яких типів циркуляції там найчастіше спостерігаються інтенсивні шторми взимку, і в яких ситуаціях швидкість вітру в цих штормах найвища. Модифікації цієї класифікації з успіхом використовуються при аналізі синоптичних процесів, за яких розвиваються такі небезпечні гідрометеорологічні явища як повені та посухи [27, 28].

5 ВИСНОВКИ

Класифікація синоптичних процесів залишається одним із основних методів синоптичного аналізу, оскільки різні типи регіональної циркуляції атмосфери характеризуються своїм набором синоптичних об'єктів, що визначають умови погоди виділеного регіону. Розвиток об'єктивних класифікацій набув нового значення в умовах новітніх комп'ютерних технологій і збільшення обчислювальних можливостей, а також через доступність якісних сіткових тривимірних полів метеорологічних величин, що надаються провідними світовими центрами даних. Створення нових алгоритмів для визначення типів циркуляції атмосфери, в які залучені як приземні, так й висотні дані про стан атмосферних потоків, повинно поліпшити якість самих класифікацій через врахування тривимірної структури синоптичних об'єктів, для подальшого вивчення просторово-часової мінливості регіональних синоптичних процесів та їх застосування в цілях прогнозу погоди різної завчасності.

В даному дослідженні для класифікації

синоптичних процесів на території України запропонований модифікований метод Дженкінсона-Коллісона, який ґрунтується на використанні сіткових даних поля тиску біля поверхні землі та на ізобаричній поверхні 500 гПа. Первинний аналіз отриманих результатів щоденного класифікування регіональних циркуляційних процесів за 74-річний період дозволив оновити інформацію про найбільш повторювані та рідкісні синоптичні процеси в регіоні в різні сезони року.

Подальша робота з адаптації, удосконалення та створення каталогу щоденних типів циркуляції на основі модифікованої класифікації Дженкінсона-Коллісона для території України сприятиме розв'язанню низки питань стосовно впливу синоптичної ситуації на формування несприятливих погодних умов та небезпечних явищ погоди.

ПОДЯКА

Це дослідження виконано за підтримки проекту «Розробка методології комплексного моніторингу та прогнозування посух та пожежонебезпечних умов погоди в Україні» (UCRAN20044), що фінансується Національною дослідницькою радою Іспанії (CSIC).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cahynová M., Huth R. Atmospheric circulation influence on climatic trends in Europe: an analysis of circulation type classifications from the COST733 catalogue. *Int. J. Climatol*. 2016. 36. Pp. 2743-2760. https://doi.org/10.1002/joc.4003.
2. Ibebuchi C. Patterns of atmospheric circulation in Western Europe linked to heavy rainfall in Germany: preliminary analysis into the 2021 heavy rainfall episode. *Theor. Appl. Climatol.* 2022. 148. Pp. 269–283. https://doi.org/10.1007/s00704-022-03945-5
3. The influence of weather regimes on European renewable energy production and demand / Van der Wiel K., Bloomfield H .C., Lee R. W., Stoop L. P., Blackport R., Screen J. A., Selten F. M. *Environ. Res. Lett.* 2019. 14 094010. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab38d3
4. Hess P., Brezowsky H. Katalog der großwetterlagen europas (catalog of the european large scale weather types). Technical report, Ber. Dt. Wetterd. in der US-Zone 33. Bad Kissingen, Germany, 1952. 39 p.
5. Karossy C. P´eczely's classification of macrosynoptic types and the catalogue of weather situations (1951–1992). *Light Trapping of Insects Influenced by Abiotic Factors. Part I* / Edited by Nowinsky L. Savaria University Press, Szombathely, Hungary, 1994. Pp.117–130.
6. Tveito O. E., Huth R. Circulation-type classifications in Europe: results of the COST 733 Action. *Int. J. Climatol*. 2016. 36. Pp. 2671-2672. https://doi.org/10.1002/joc.4768
7. Trends in frequency and persistence of atmospheric circulation types over Europe derived from a multitude of classifications / Kučerová M., Beck C., Philipp A., Huth R. *Int. J. Climatol*. 2017. 37. Pp. 2502-2521. https://doi.org/10.1002/joc.4861
8. Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software / Philipp A., Beck C., Huth R., Jacobeit J. *Int. J. Climatol*. 2016. 36. Pp. 2673-2691. https://doi.org/10.1002/joc.3920
9. Jenkinson A. F., Collison F. P. An initial climatology of gales over the North Sea. *Synoptic climatology branch memorandum*. Vol. 62. Meteorological Office, London, UK, 1977. 18 p.
10. Jones P. D., Hulme M., Briffa K. R. A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *Int. J. Climatol*. 1993. 13. Pp. 655-663. https://doi.org/10.1002/joc.3370130606
11. Vicente-Serrano S. M., López-Moreno J. I. The influence of atmospheric circulation at different spatial scales on winter drought variability through a semi-arid climatic gradient in Northeast Spain. *Int. J. Climatol*. 2006. 26. Pp. 1427-1453. https://doi.org/10.1002/joc.1387
12. Determination of the Jenkinson and Collison's weather types for the western Mediterranean basin over the 1948-2009 period. Temporal analysis / Grimalt M., Tomàs M., Alomar G., Martin-Vide J., Moreno-García M. C. *Atmósfera*. 2012. 26(1). Pp. 75-94. https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71063-4
13. Spellman G. An assessment of the Jenkinson and Collison synoptic classification to a continental mid-latitude location. *Theor. Appl. Climatol*. 2017. 128. Pp. 731–744. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1711-8
14. Martin-Vide J. Limitations of an objective weather-typing system for the Iberian Peninsula. *Weather*. 2001. 56(7). Pp. 248-250. https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.2001.tb06585.x
15. James P. An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theor. Appl. Climatol.* 2007. 88. Pp. 17–42. https://doi.org/10.1007/s00704-006-0239-3
16. Daily atmospheric circulation patterns for Catalonia (northeast Iberian Peninsula) using a modified version of Jenkinson and Collison method / Miró J. R., Pepin N., Peña J. C., Martin-Vide J. *Atmosph. Res*. 2020. 231. 104674. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104674.
17. The NCEP/NCAR Reanalysis Project at the NOAA Physical Sciences Laboratory. URL: https://psl.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml (дата звернення 17.08.2023 р.)
18. Martin-Vide J. M., Valentí J. V. Mapas del tiempo: fundamentos, interpretación e imágenes de satélite. Oikos-Tau, 1991. 16 p. URL: https://campus.usal.es/~geografia/PDFsgeografiayensenanzasmedias/DOSIER-Taller2.pdf (дата звернення 05.10.2023 р.)
19. Identification and Climatology of Cut-off Lows near the Tropopause / Nieto R., Sprenger M., Wernli H., Trigo R. M., Gimeno L. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2008. 1146. Pp. 256-290. https://doi.org/10.1196/annals.1446.016
20. Climatological Features of Cutoff Low Systems in the Northern Hemisphere / Nieto R., Gimeno L., de la Torre L., Ribera P., Gallego D., García-Herrera R., García J. A., Nuñez M., Redaño A., Lorente J. *J. Climate*. 2005. 18(16). Pp. 3085-3103. https://doi.org/10.1175/JCLI3386.1
21. Awan N. K., Formayer H. Cutoff low systems and their relevance to large-scale extreme precipitation in the European Alps. *Theor Appl Climatol*. 2017. 129. Pp. 149–158. https://doi.org/10.1007/s00704-016-1767-0
22. Семенова І. Г., Нажмудінова О. М. Регіональна синоптика: підручник. Одеський державний

екологічний університет. Одеса: ТЕС, 2019. 212 с.
23. Khokhlov V., Umanska O. European Atmospheric Circulation Classifications. *J. Geography, Environment and Earth Science International*. 2018. 6(3). Pp. 1–8. https://doi.org/10.9734/JGEESI/2018/41860
24. Hoy A., Sepp M., Matschullat J. Atmospheric circulation variability in Europe and northern Asia (1901 to 2010). *Theor. Appl. Climatol*. 2013. 113. Pp. 105–126. https://doi.org/10.1007/s00704-012-0770-3
25. Herrera-Lormendez P., Douville H., Matschullat J. European summer synoptic circulations and their observed 2022 and projected influence on hot extremes and dry spells. *Geoph. Res. Lett*. 2023. 50. e2023GL104580. https://doi.org/10.1029/2023GL104580
26. Examination of wind storms over Central Europe with respect to circulation weather types and NAO phases / Donat M. G., Leckebusch G. C., Pinto J. G., Ulbrich U. *Int. J. Climatol.* 2010. 30. Pp. 1289-1300. https://doi.org/10.1002/joc.1982
27. Atmospheric circulation as a factor contributing to increasing drought severity in central Europe / Lhotka O., Trnka M., Kyselý J., Markonis Y., Balek J., Možný M. *J. Geoph. Res: Atmospheres.* 2020. 125. e2019JD032269. https://doi.org/10.1029/2019JD032269
28. Gilabert J., Llasat M. C. Circulation weather types associated with extreme flood events in Northwestern Mediterranean. *Int. J. Climatol*. 2018. 38. Pp. 1864-1876. https://doi.org/10.1002/joc.5301

REFERENCES

1. Cahynová, M. & Huth, R. (2016). Atmospheric circulation influence on climatic trends in Europe: an analysis of circulation type classifications from the COST733 catalogue. *Int. J. Climatol*., 36, pp. 2743-2760. https://doi.org/10.1002/joc.4003.
2. Ibebuchi, C. (2022). Patterns of atmospheric circulation in Western Europe linked to heavy rainfall in Germany: preliminary analysis into the 2021 heavy rainfall episode. *Theor. Appl. Climatol*., 148, pp. 269–283. https://doi.org/10.1007/s00704-022-03945-5.
3. Van der Wiel, K., Bloomfield, H.C., Lee, R.W., Stoop, L. P., Blackport, R., Screen, J.A. & Selten, F.M. (2019). The influence of weather regimes on European renewable energy production and demand. *Environ. Res. Lett*., 14 094010. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab38d3
4. Hess, P. & Brezowsky, H. (1952). *Katalog der großwetterlagen europas (catalog of the european large scale weather types)*. Technical report, Ber. Dt. Wetterd. in der US-Zone 33, Bad Kissingen, Germany.
5. Karossy, C. (1994). P´eczely's classification of macrosynoptic types and the catalogue of weather situations (1951–1992). In: Nowinsky, L. (Ed.), *Light Trapping of Insects Influenced by Abiotic Factors*, Part I. Savaria University Press, Szombathely, Hungary, pp.117–130.
6. Tveito, O.E. & Huth, R. (2016). Circulation-type classifications in Europe: results of the COST 733 Action. *Int. J. Climatol*., 36, pp. 2671-2672. https://doi.org/10.1002/joc.4768
7. Kučerová, M., Beck, C., Philipp, A. & Huth, R. (2017). Trends in frequency and persistence of atmospheric circulation types over Europe derived from a multitude of classifications. *Int. J. Climatol.,* 37. pp. 2502-2521. https://doi.org/10.1002/joc.4861
8. Philipp, A., Beck, C., Huth, R. & Jacobeit, J. (2016). Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. *Int. J. Climatol*., 36, pp. 2673-2691. https://doi.org/10.1002/joc.3920
9. Jenkinson, A.F. & Collison, B.P. (1977). An initial climatology of gales over the North Sea. In: *Synoptic Climatololgy Branch Memorandum.* Vol. 62. Meteorological Office, London, UK.
10. Jones, P.D., Hulme, M. & Briffa, K.R. (1993). A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *Int. J. Climatol*., 13, pp. 655-663. https://doi.org/10.1002/joc.3370130606
11. Vicente-Serrano, S.M.& López-Moreno, J.I. (2006). The influence of atmospheric circulation at different spatial scales on winter drought variability through a semi-arid climatic gradient in Northeast Spain. *Int. J. Climatol*., 26, pp. 1427-1453. https://doi.org/10.1002/joc.1387
12. Grimalt, M., Tomàs, M., Alomar, G., Martin-Vide, J., Moreno-García, M.C. (2012). Determination of the Jenkinson and Collison's weather types for the western Mediterranean basin over the 1948-2009 period. Temporal analysis. *Atmósfera*, 26(1). pp. 75-94. https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71063-4
13. Spellman, G. (2017). An assessment of the Jenkinson and Collison synoptic classification to a continental mid-latitude location. *Theor. Appl. Climatol*., 128, pp. 731–744. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1711-8
14. Martin-Vide, J. (2001). Limitations of an objective weather-typing system for the Iberian Peninsula. *Weather*, 56(7), pp. 248-250. https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.2001.tb06585.x
15. James, P. (2007). An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theor. Appl. Climatol*., 88, pp. 17–42. https://doi.org/10.1007/s00704-006-0239-3
16. Miró, J.R., Pepin, N., Peña, J.C. & Martin-Vide, J. (2020). Daily atmospheric circulation patterns for Catalonia (northeast Iberian Peninsula) using a modified version of Jenkinson and Collison method. *Atmosph. Res*., 231, 104674. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104674.
17. *The NCEP/NCAR Reanalysis Project at the NOAA Physical Sciences Laboratory*. URL: https://psl.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml (Accessed: 17.08.2023)
18. Martin-Vide, J.M. & Valentí, J.V. (1991). *Mapas del tiempo: fundamentos, interpretación e imágenes de satélite.* Oikos-Tau. URL: https://campus.usal.es/~geografia/PDFsgeografiayensenanzasmedias/DOSIER-Taller2.pdf (Accessed: 05.10.2023).
19. Nieto, R., Sprenger, M., Wernli, H., Trigo, R.M. & Gimeno, L. (2008). Identification and Climatology of Cut-off Lows near the Tropopause. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146, pp. 256-290. https://doi.org/10.1196/annals.1446.016
20. Nieto, R., Gimeno, L., de la Torre, L., Ribera, P., Gallego, D., García-Herrera, R., García, J. A., Nuñez, M., Redaño, A., & Lorente, J. (2005). Climatological Features of Cutoff Low Systems in the Northern Hemisphere. *J. Climate*, 18(16), pp. 3085-3103. https://doi.org/10.1175/JCLI3386.1
21. Awan, N.K. & Formayer, H. (2017). Cutoff low systems and their relevance to large-scale extreme precipitation in the European Alps. *Theor. Appl. Climatol*., 129, pp. 149–158. https://doi.org/10.1007/s00704-016-1767-0
22. Semenova, I.G. & Nazhmudinova, O.M. (2019). *Rehionalna synoptyka [Regional synoptic processes]*. Odesa State Environmental University. Odesa: TES.
23. Khokhlov, V. & Umanska, O. (2018). European Atmospheric Circulation Classifications. *J. Geogr., Environ. Earth Sci. Int.,* 6(3), pp. 1–8.

https://doi.org/10.9734/JGEESI/2018/41860
24. Hoy, A., Sepp, M., & Matschullat, J. (2013). Atmospheric circulation variability in Europe and northern Asia (1901 to 2010). *Theor. Appl. Climatol*., 113, pp. 105–126. https://doi.org/10.1007/s00704-012-0770-3
25. Herrera-Lormendez, P., Douville, H. & Matschullat, J. (2023). European summer synoptic circulations and their observed 2022 and projected influence on hot extremes and dry spells. *Geophys. Res. Lett.,* 50, e2023GL104580. https://doi.org/10.1029/2023GL104580
26. Donat, M.G., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G. & Ulbrich, U. (2010). Examination of wind storms over Central Europe with respect to circulation weather types and NAO phases. *Int. J. Climatol*., 30, pp. 1289-1300. https://doi.org/10.1002/joc.1982
27. Lhotka, O., Trnka, M., Kyselý, J., Markonis, Y., Balek, J. & Možný, M. (2020). Atmospheric circulation as a factor contributing to increasing drought severity in central Europe. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 125, e2019JD032269. https://doi.org/10.1029/2019JD032269
28. Gilabert, J. & Llasat, M.C. (2018). Circulation weather types associated with extreme flood events in Northwestern Mediterranean. *Int. J. Climatol*., 38, pp. 1864-1876. https://doi.org/10.1002/joc.5301

CLASSIFICATION OF SYNOPTIC PROCESSES IN THE TERRITORY OF UKRAINE USING A MODIFIED JENKINSON AND COLLISON METHOD

I. G. Semenova[1,2]

[1]*Odessa State Environmental University,*
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine,
[2]*Instituto Pirenaico de Ecología,*
Avda. Montañana, 1005, Zaragoza, Spain
in_home@ukr.net https://orcid.org/0000-0003-3383-4848

During the year, the territory of Ukraine is under the influence of various synoptic processes, which have a certain evolution in the surface conditions of the region and sometimes lead to the formation of unfavorable and dangerous weather conditions. The classification of synoptic processes makes it possible to create a set of daily synoptic situations taking into account the characteristics of a certain region, both for their use in weather forecasting and for studying the dynamics of regional synoptic processes under climate change. In this study, the modified version of Jenkinson and Collison method is used to classify synoptic processes on the territory of Ukraine, which is based on pressure data at the sea surface level and the geopotential heights at the level 500 hPa. The analysis of the obtained set of daily types of atmospheric circulation for the period 1948-2021 and the composite pressure fields built for each circulation type showed that all synoptic situations are clearly defined according to the classification and have seasonal features of frequency. During the year, advective processes of the western circulation group prevail, eastern advection is also often observed, and this type of circulation dominates in the spring months. The processes of the southern group are most relevant on the cold period of the year. Anticyclones occur more often over the region in winter and autumn, and cyclones are observed in summer and spring. The inclusion of 500 hPa level data in the classification makes it possible to take into account the three-dimensional structure of synoptic objects and distinguish such types of circulation as low cyclones and cold anticyclones, as well as troughs and cut-off lows at heights. It was found that low (thermal) cyclones and anticyclones make up a small proportionof synoptic situations, so the feasibility of their further inclusion in the typification for the territory of Ukraine is being discussed. The processes associated with the cut-off lows at the upper levels turned out to quite rare, but due to the possibility of the formation of dangerous weather conditions, this type of circulation is necessary in the classification of regional synoptic processes.

Keywords: circulation type, regional synoptic process, advection, synoptic object, synoptic classification

Подання до редакції **: 09. 10. 2023**
Надходження остаточної версії **: 19. 12. 2023**
Публікація статті : **21. 12. 2023**

Ukrainian hydrometeorological journal, 2023, 32, 34-49 doi: 10.31481/uhmj.32.2023.03
ISSN 2311-0902 (print), 2616-7271 (online)

УДК 556.531

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ЗАБРУДНЕННЯ БІОГЕННИМИ РЕЧОВИНАМИ РІЧКИ КОГИЛЬНИК НА ОСНОВІ ПРОБІТ-ФУНКЦІЙ

Н. С. Лобода, А. М. Куза

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
natalie.loboda@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0794-9951

Актуальність роботи обумовлена необхідністю визначення ризиків високого та катастрофічного рівня забруднення вод річки Когильник. Якість вод цієї річки впливає на екологічний стан північної частини озера-водосховища Сасик. Це штучно створене на базі лиману водосховище у минулі роки було частиною Дунай-Дністровської зрошувальної системи і у майбутньому може бути використаним для зрошування у післявоєнний період. Оскільки Північно-Західне Причорномор'я належить до сільськогосподарського регіону України, то основна увага приділялася забрудненню річки біогенними речовинами (амоній, нітрити, нітрати, фосфати). Предметом досліджень є оцінка екологічних ризиків забруднення річки Когильник у сучасних умовах. Вихідними матеріалами досліджень були дані гідрохімічних спостережень Державного агентства водних ресурсів України, які проводилися у верхньому (нижче кордону з Молдовою) та нижньому створах (за 12 км до гирла) річки. Кількість проб у верхньому створі дорівнює 80, у нижньому – 56. Оцінка якості води виконана за модифікованим індексом забруднення води (ІЗВ). Ризики забруднення біогенними речовинами розраховані на основі статистичного підходу з використанням пробіт-функції. Встановлено, що якість води у верхньому створі гірша у порівнянні з нижнім. Виявлено тісний зв'язок між показниками якості води та розрахованими значеннями екологічного ризику. У верхньому створі ризики забруднення катастрофічного рівня мають ймовірність появи 46,1 %, а високого – 41,1, що в сумі становить 87,2 %. У нижньому створі ймовірність ризику забруднення високого рівня дорівнює 33,3 %, а критичний ризик у період спостережень не виявлений. Трофність водного об'єкта по довжині річки змінюється з гіпертрофного та політрофного стану у верхній течії до евтрофного та мезотрофного у нижній течії. Зниження рівня забруднення у нижньому створі пояснюється процесами біологічного, фізичного та хімічного самоочищення водної екосистеми. Оскільки біогенні речовини мають переважно антропогенне походження, покращення якості води річки Когильник на території України обумовлено зменшенням надходженням комунальних та сільськогосподарських стічних вод до русла річки. Забруднення біогенними речовинами потребує проведення додаткових заходів у вигляді підвищення культури землеробства на водозборі (наприклад, під час збереження та внесення добрив).

Ключові слова: екологічні ризики забруднення; пробіт-функції; біогенні речовини; річка Когильник; озеро-водосховище Сасик

1 ВСТУП

Актуальність роботи обумовлена необхідністю оцінки ризиків забруднення річки Когильник, яка впадає у північну частину озера-водосховища Сасик. Це штучно створене на базі лиману водосховище у минулі роки було частиною Дунай-Дністровської зрошувальної системи і має бути використаним для зрошування у майбутньому [1]. Особливої значущості колишній розпріснений лиман Сасик набуде у післявоєнний період, коли відновлення зрошуваного землеробства півдня України стане головною задачею сільського господарства. В умовах глобального потепління надходження прісних вод до озера-водосховища зменшується, а дефіцит водного балансу зростає [2]. Разом із зменшенням водності річок, які впадають у лиман, погіршується якість їх вод [3].

Проблема полягає у необхідності визначення ступеня забруднення вод річки Когильник та її екологічного стану у сучасних умовах.

Метою роботи є установлення якості вод

річки Когильник і розрахунки ймовірності формування високого та критичного рівня забруднення. Оскільки басейн річки Когильник майже повністю зайнятий сільськогосподарськими масивами, основна увага приділялася забрудненню біогенними речовинами (амоній, нітрити, нітрати, фосфати).

Об'єктом досліджень є оцінка забруднення поверхневих вод у районах розвинутого сільськогосподарського використання.

Предметом досліджень є оцінка екологічних ризиків забруднення річки Когильник біогенними речовинами у сучасності.

Опис водного об'єкту. Річка Когильник є трансграничною річкою. Вона протікає через території Молдови та України (Арцизький, Татарбунарський, Тарутинський і Саратський райони Одеської області). Річка бере початок неподалік від с. Бурсук (Молдова), впадає в озеро-водосховище Сасик. Загальна довжина річки Когильник становить 243 км, площа водозбірного басейну 3910 км^2. Близько 50 % водозбору розташовано на території Молдови. Середня і нижня течія знаходяться на території Одеської області. Середня річна витрата води становить 0,30 м^3/с, максимальна – 6,47 м^3/с, а мінімальна – 0,0006 м^3/с. Річний стік регулюється ставками. Основні притоки: ліві – Скиноса, Чага, Джалар, Чилігідер; праві – Бахмутка, Кагач [4]. Середній багаторічний стік води річки Когильник у озеро -водосховище Сасик становить 44,5 млн м^3. Мінералізація води річки Когильник може досягати 6000 мг/дм^3 [5]. Басейн річки Когильник відноситься до північно-степової та південно-степової природної підзони [6]. На території водозбору переважають чорноземи звичайні малогумусні [4]. На території водозбору річки Когильник внаслідок зливових опадів та розмивання гірських порід формуються водно-ерозійні форми рельєфу, такі як яри, балки, річкові долини. Як відомо, розростання і збільшення площі ярів значно шкодить сільському господарству [7].

Вода хлоридно-гідрокарбонатна (іноді сульфатна), натрієво-магнієва, мінералізація становить 2000–3500 мг/дм^3. За даними [8] у середньому мінералізація вод Когильника складає 3328,21 мг/дм^3 (табл. 1), в останні 30 років мінералізація змінювалась від 1063 до 6336 мг/дм^3 [8]. Стік зарегульований чисельними ставками, є шлюзи-регулятори. Річка використовується переважно для сільськогосподарських і побутових потреб міста Арциз [9].

Огляд літератури. За даними роботи [10] природний, тобто непорушений водогосподарською діяльністю, річний стік річки Когильник постійно зменшується у часі внаслідок глобального потепління. До 1989 року середній багаторічний стік річки становив 58,2 млн. м^3, у період 1989 – 2018 рр. – 53,6 млн.м^3, Рік 1989 є переламним для рівнинної України, коли зміни середніх річних температур повітря стали статистично значущими [11]. У реальності стік річки Когильник менший на 25-30 % у порівнянні із природним за рахунок втрат на заповнення та додаткове випаровування з поверхні штучних водойм. За результатами розрахунків стоку річки Когильник на основі математичної моделі «клімат-стік» з використанням на вході метеорологічних даних сценарію змін клімату RCP4.5 на 2021-2050 рр. середній багаторічний об'єм стоку за рік буде становити 45,1 млн. м^3, а за більш "жорстким" сценарієм RCP8.5 – 36,6 млн. м^3. За даними Басейнового управління водних ресурсів річок Північно-Західного Причорномор'я та нижнього Дунаю площа водної поверхні на водозборі р. Когильник дорівнює 0,866 тис. га, об'єм штучних водойм – 11,43 млн.м^3, відносна площа водної поверхні становить 0,22 %.

Аналіз вмісту біогенних речовин [12] у річці Когильник за період 2003-2008 рр. показав, що концентрації нитритів, аміаку, фосфору та заліза у нижньому створі (р. Когильник – с. Новоолексіївка) є меншими, ніж у верхньому (р. Когильник - с. Серпневе, кордон із Молдовою).

Річка Когильник разом з іншими річками Північно-Західного Причорномор'я була досліджена на чутливість до забруднення сполуками азоту. При цьому використовувалися поквартальні дані гідрохімічних спостережень Басейнового Управління водними ресурсами річок Причорномор'я та Нижнього Дунаю за період 2000–2018 роки. На основі цих даних було установлено, що є ризик забруднення сполуками азоту у верхньому створі в окремі роки [13]. Екологічні ризики забруднення сполуками азоту розраховувалися шляхом співставлення коефіцієнту чутливості до забруднення із пороговим значенням, яке дорівнювало 50 мг/дм^3 або 11,3 мг N/дм^3 [14]. Отримані співвідношення зважувалися по ймовірності перевищення порогового значення. Ймовірнісна модель оцінки екологічних ризиків

такого виду також була застосована під час оцінки ступеня забруднення поверхневих вод індустріально розвинутих територій Сіверського Донця [15].

У світовій практиці широко застосовується для оцінки екологічних ризиків ймовірнісна модель, яка базується на так званій пробіт-функції, пов'язаної із нормальним законом розподілу [16]. Перевагою цього підходу є розроблені шкали екологічних ризиків, на основі яких виконується узгодження між показниками ризику та характеристиками якості і екологічним станом поверхневих вод [17, 18].

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У роботі використані матеріали Державного агентства водних ресурсів України [19]. Для гідрохімічного дослідження були використані дані спостережень по верхньому створу (ВС) (р. Когильник, с. Серпневе, кордон з Молдовою, 131 км від гирла) та по нижньому створу (НС) (р. Когильник, с. Новоолексіївка, 12 км від гирла). Довжина ряду спостережень по ВС складає 30 років (1994 р. – 2023 р.), по НС – складає 26 років (1994 р. – 2019 р.). У проведеному дослідженні розглядався період спостережень з 2005 р. по 2023 р., коли були у наявності дані спостережень за наступними елементами: біохімічне споживання кисню за 5 діб, завислі речовини, розчинений кисень, сульфати, хлориди, фосфати, азот амонійний, азот нітратний, азот нітритний. У цілому для ВС налічується 80 проб, а для НС – 56 проб.

Для оцінки якості вод річки Когильник був використаний модифікований індекс забруднення води [20]. Для оцінки екологічних ризиків високого та катастрофічного забруднення використаний ймовірнісний метод, який базується на пробіт-функції [16].

Метод оцінки якості вод за розрахунком гідрохімічного індексу забруднення води (ІЗВ) входить до групи комплексних оцінок якості води [21]. За даними фактичних та нормативних концентрацій 6 гідрохімічних показників (азот амонійний, азот нітритний, нафтопродукти, феноли, розчинений кисень, $БСК_5$) розраховується стандартний індекс забруднення води. В залежності від значення ІЗВ надається оцінка рівня забруднення води відповідно семи класів якості (від «дуже чиста» до «надзвичайно брудна», табл. 1). Віднесення стану водного об'єкта до І класу свідчить про те, що його води перебувають під мінімальним антропогенним навантаженням, їх гідроекологічні показники близькі до природних значень для даного регіону; ІІ клас – це води з певними змінами щодо природного стану, однак зміни поки що не порушили екологічної рівноваги; ІІІ клас – води зі значним антропогенним впливом, рівень якого близький до межі стійкості екосистем; води вищих класів (IV – VII) – це води з порушеними екологічними параметрами, їх екологічний стан оцінюється як «екологічний регрес».

Показник ІЗВ (індекс забруднення води) розраховується за формулою

$$ІЗВ = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}\frac{C_i}{ГДК_i}, \qquad (1)$$

де C_i – концентрація гідрохімічних показників; $ГДК_i$ – норматив вмісту показника у воді; n – кількість показників [22].

Модифікований ІЗВ також розраховується за шістьма показниками, але, окрім $БСК_5$ та O_2, додатково беруться інші чотири гідрохімічні показника за найбільшим відношенням до ГДК. Оскільки розглядається забруднення біогенними речовинами, то у якості цих показників були використані такі елементи: розчинений кисень, біологічне споживання кисню за 5 діб, вміст амонію, нітритів, нітратів, фосфору.

Таблиця 1 – Класи якості вод в залежності від значення індексу забруднення води
Table 1 - Water quality classes depending on the value of the water pollution index

Опис якості води	Дуже чисті	Чисті	Помірно забруднені	Забруднені	Брудні	Дуже брудні	Надзвичайно брудні
Значення ІЗВ	до 0,20	0,21-1,00	1,10-2,00	2,01-4,00	4,01-6,00	6,01-10,0	>10,0
Класи якості вод	I	II	III	IV	V	VI	VII

Першочергово метод оцінки екологічних ризиків погіршення екологічного стану водних об'єктів має базуватися на біологічних даних [23]. Так званий метод біоіндикації є оцінкою екологічних ризиків для водних об'єктів, яка ґрунтується на біологічній чутливості, реакції певних організмів, розподілі видової чутливості [24, 25]. Такі підходи передбачають проведення спеціальних досліджень, які поки що на річках України обмежені. Для полегшення і доступності розрахунків, Директивою 2000/60/ ЄС було запропоновано включати для аналізу ті пріоритетні речовини, які можуть бути надані офіційними особами за даними моніторингу та статистичної звітності [26].

Ризик порушення благополуччя водної екосистеми був оцінений шляхом визначення пробіт-функції за таким рівнянням [18]

$$\Pr ob = -2{,}3 + 2{,}21 \lg \sum \frac{C_i}{C_{EH_i}}, \qquad (2)$$

де P_{rob} - показник пробіт, який є функцією квантіля, що пов'язаний із стандартним нормальним законом розподілу [16]; C_i - концентрація і-ї речовини у водоймі, мг/дм^3 ; C_{EH_i} – екологічний стандарт (ГДК) для i-ї речовини у водоймі, мг/дм^3.

Для визначення показника екологічного ризику ER за даними про пробіт-функції в літературі розроблені та наведені спеціальні таблиці [17]. В залежності від значення установленого показника ER надається оцінка класу якості води, якісна оцінка ступеня екологічного ризику та трофності водного об'єкту (табл. 2).

Трофність характеризує абсолютне і відносне багатство екотопів на поживні речовини [27]. Трофність водойми може розглядатися як її характеристика за біологічною продуктивністю, зумовленою вмістом біогенних елементів [28]. В залежності від рівня утворення первинної продукції водні екосистеми поділяють на оліготрофні (малопродуктивні), мезотрофні (середньопродуктивні), евтрофні (високопродуктивні) і гіперевтрофні (надмірно продуктивні). Оліготрофні водойми (прісноводна екосистема) бідні на мінеральні речовини, містять мало поживних речовин, всі відмерлі речовини майже цілком розкладаються. Мезотрофні водойми мають середній вміст біогенних речовин. Евтрофні водойми багаті на поживні для рослин речовини. Мінералізація відмерлих рослин часто відбувається за участю анаеробів. Кисень у воді практично відсутній. Колообіг мінеральних речовин загальмований і неповний. Так звана «культурна евтрофікація» спричинена антропогенними надходженнями поживних речовин, як правило, скиданням стічних вод або надходженням добрив із сільськогосподарських угідь. Гіпертрофні води можуть сильно деградувати. Ці водойми характеризуються шкідливим цвітінням синьо-зелених водоростей протягом літа, що погіршує якість питної води і може виділяти токсичні органічні сполуки, які є надзвичайно стресовими і навіть смертельними для гідробіонтів. Таким чином, використання методу пробіт-функції дозволяє визначити ступінь ризику ("незначний" – "критичний") та указати на екологічні наслідки забруднення біогенними елементами у вигляді трофності.

Таблиця 2 – Оцінка ступеня екологічного ризику за показником ER [17,18]

Table 2 - Assessment of the degree of environmental risk according to the ER indicator

Клас якості води	ER	Якісна оцінка екологічного ризику	Трофність
I відмінний	0,01-0,19	Незначний ризик	Оліготрофний
II добрий	0,20-0,39	Підвищений ризик	Мезотрофний
III задовільний	0,40-0,59	Значний ризик	Евтрофний
IV незадовільний	0,60-0,79	Високий ризик	Політрофний
V поганий	0,80-1,00	Критичний ризик	Гіпертрофний

Перевагою методу пробіт-функції є те, що цей ймовірнісний підхід доведений до універсального практичного застосування поза залежністю від територій та часу. Універсальність може також розглядатися як недолік, оскільки індивідуальні особливості статистичного розподілу характеристик водного об'єкта не ураховуються.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Відповідно до даних моніторингу Державного агентства водних ресурсів України у період сумісних спостережень з 2007 по 2019 рік у р. Когильник, спостерігалося перевищення рибогосподарських ГДК за наступними показниками: $БСК_5$, амоній-іони, нітрат-іони, нітрит-іони, сульфати, хлориди (рис. 1-6). За досліджуваний період лише декілька разів спостерігалося перевищення нормативів концентраціями фосфатів (рис. 7, дати 27.08.2007, 14.11.2008, 7.08.2015 р.)

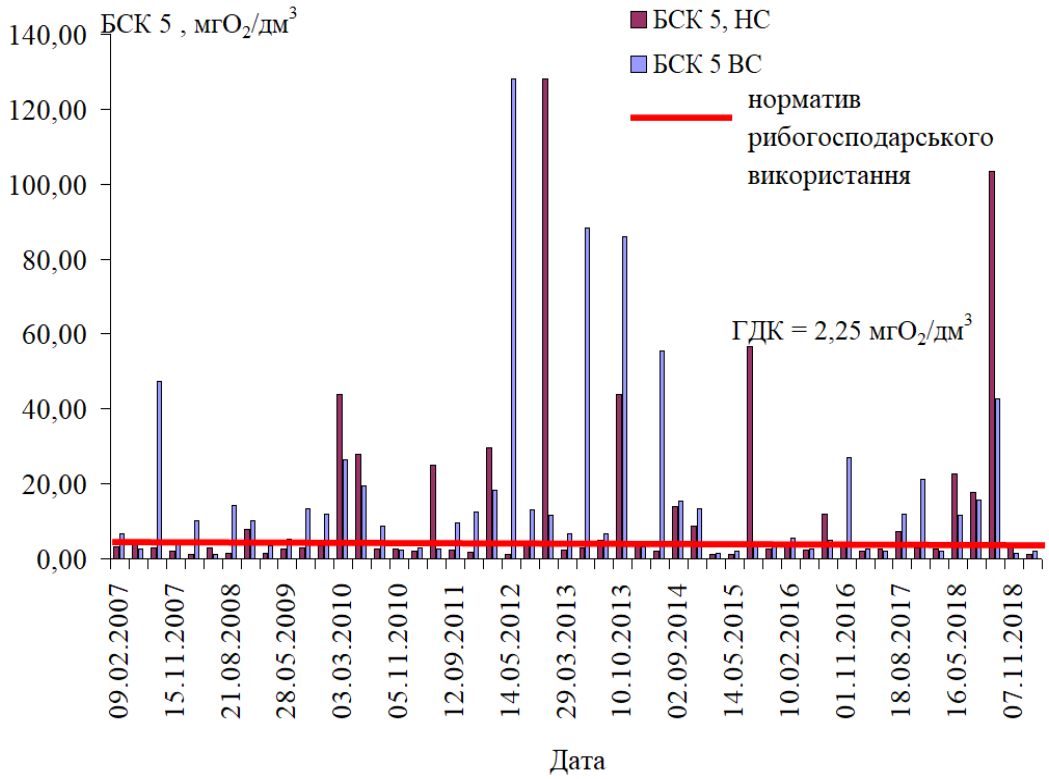


Рис. 1 – Перевищення ГДК (рибогосподарські вимоги) за показником $БСК_5$, ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 1 – Exceeding the limit permissible concentrations LPC (fishery requirements) according to the biochemical oxygen consumption BOC 5 indicator, BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

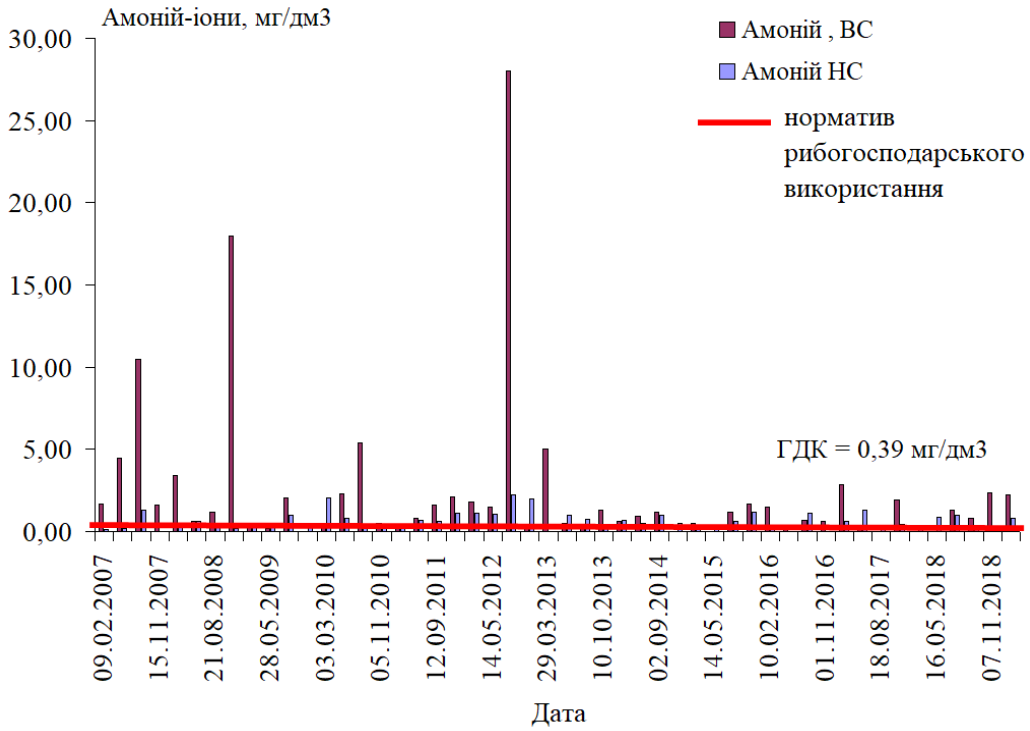


Рис. 2 – Перевищення ГДК за показником амоній-іонів (рибогосподарські вимоги), ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 2 – Exceeding the limit permissible concentrations LPC (fishery requirements) according to the indicator of ammonium ions, BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

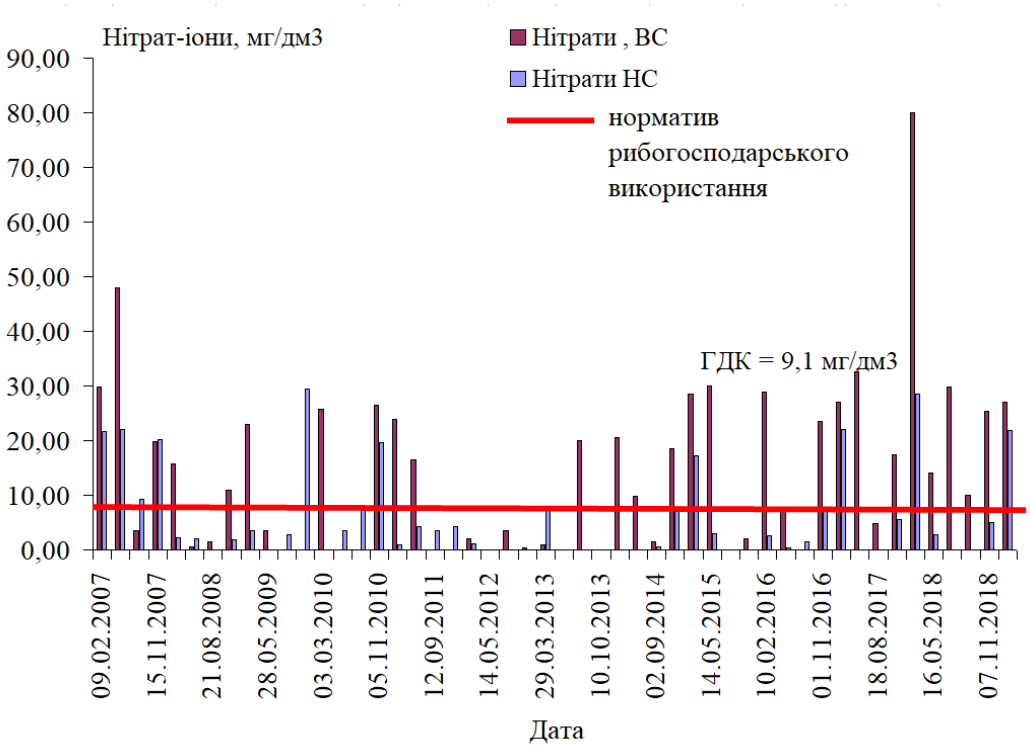


Рис. 3 – Перевищення ГДК за показником нітрат-іонів (рибогосподарські вимоги), ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 3 – Exceeding the limit permissible concentrations LPC (fishery requirements) according to the indicator of nitrate ions, BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

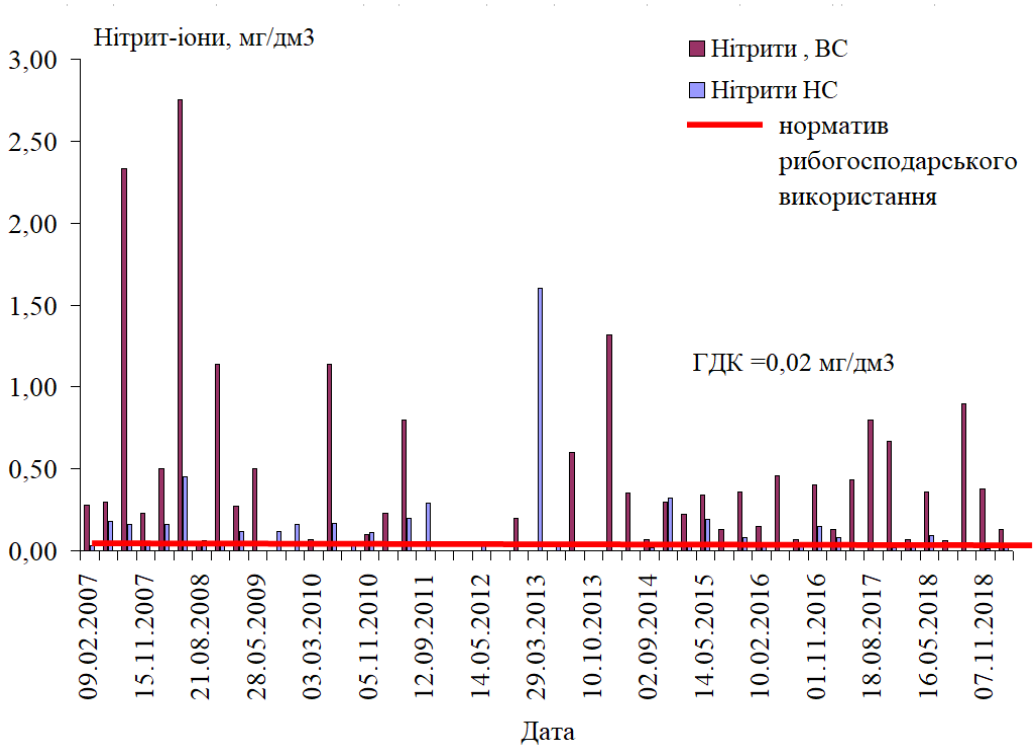


Рис. 4 – Перевищення ГДК за показником нітрит-іонів (рибогосподарські вимоги), ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 4 – Exceeding the limit permissible concentrations LPC (fishery requirements) according to the indicator of nitrite ions, BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

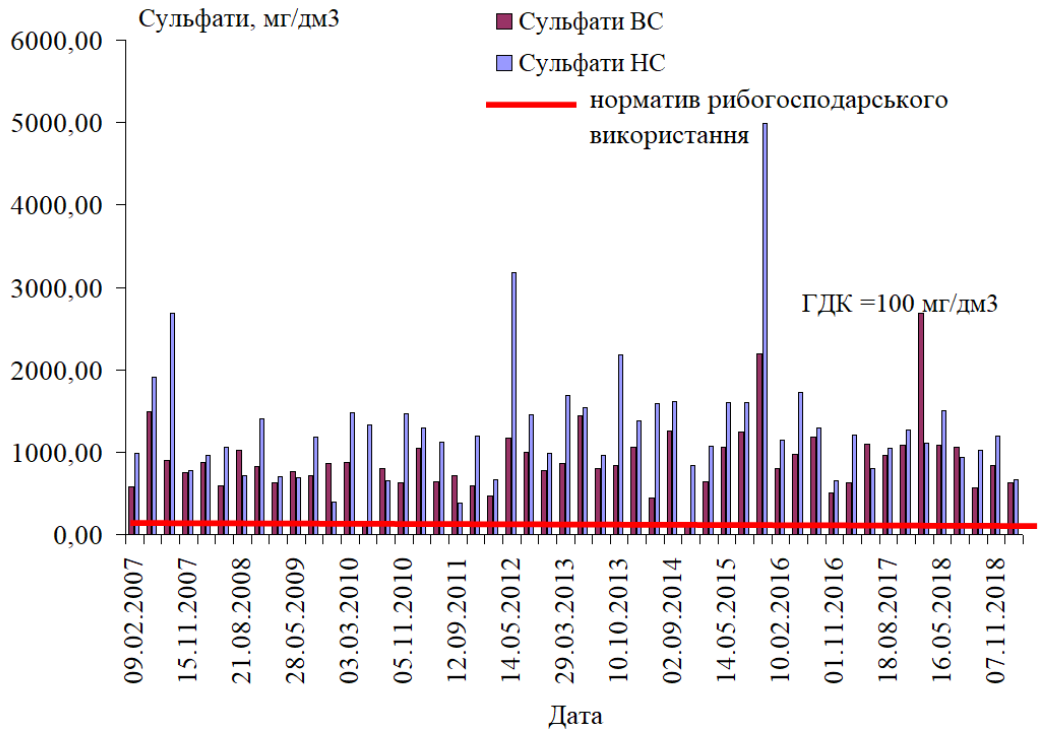


Рис. 5 – Перевищення ГДК за показником сульфатів (рибогосподарські вимоги), ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 5 – Exceeding the limit permissible concentrations LPC (fishery requirements) according to the indicator of sulfates, BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

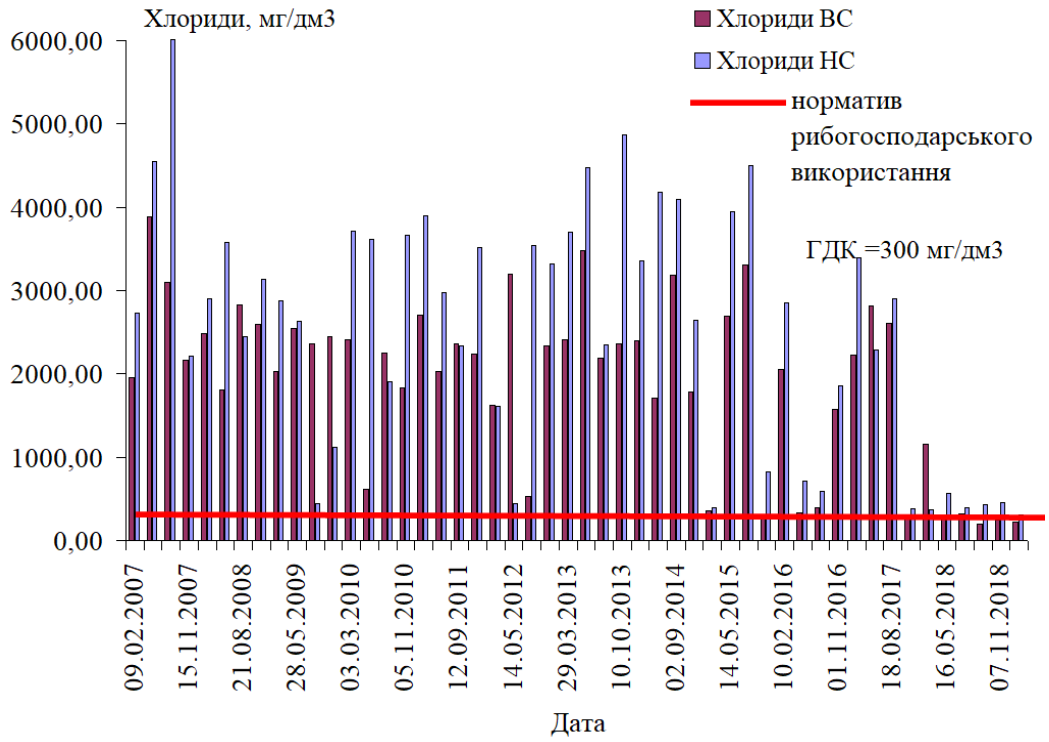


Рис. 6 – Перевищення ГДК за показником хлоридів (рибогосподарські вимоги), ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 6 – Exceeding the limit permissible concentrations LPC (fishery requirements) according to the indicator of chloride, BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

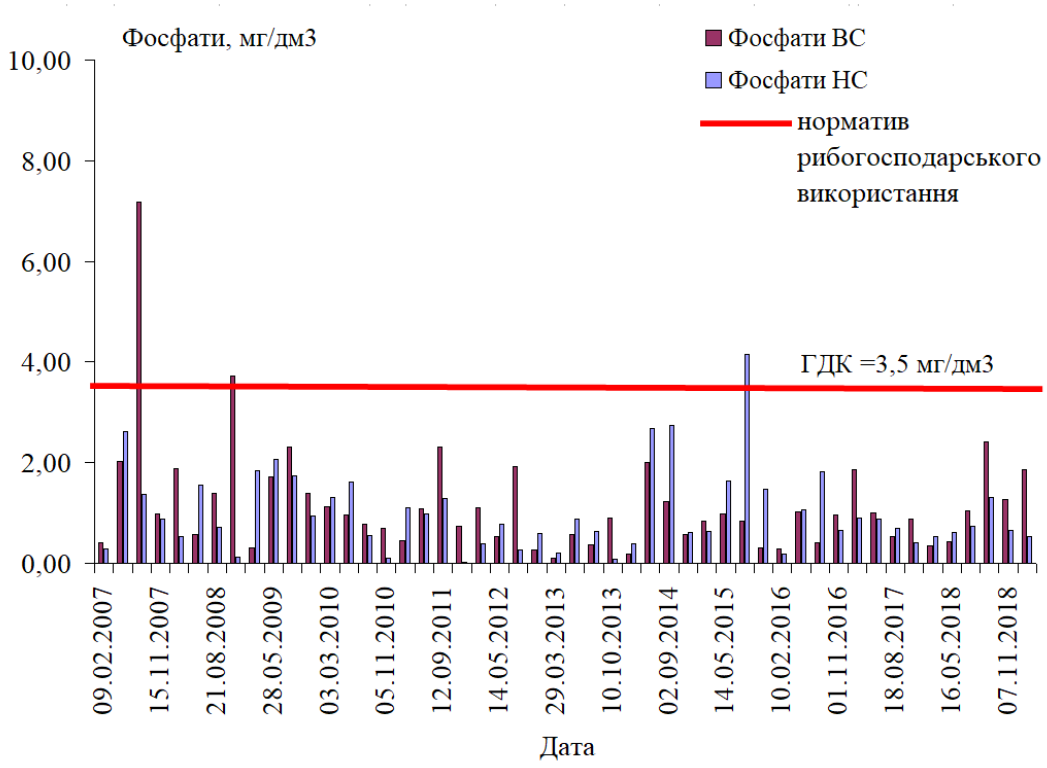


Рис. 7 – Перевищення ГДК за показником фосфатів (рибогосподарські вимоги), ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 7 – Exceeding the limit permissible concentrations LPC (fishery requirements) according to the indicator of phosphates, BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

За даними моніторингу по річці Когильник установлена емпірична ймовірність перевищення ГДК рибогосподарського використання (табл. 3). Установлена незначна ймовірність перевищення ГДК концентраціями фосфат-іонів та низька ймовірність перевищення ГДК вмістом нітрат-іонів для НС. За всіма іншими гідрохімічними елементами установлена висока ймовірність перевищення ГДК як у нижньому, так і у верхньому створах.

На графіках хронологічного ходу значень модифікованих ІЗВ (рис. 8-9) чітко простежується високий рівень забруднення у верхньому створі, що може бути пов'язано із скидами вище за течією.

Таблиця 3 – Емпірична ймовірність перевищення ГДК рибогосподарського використання вмістом хімічних елементів, що знаходяться у водах річки Когильник

Table 3 – The empirical probability of exceeding the limit permissible concentrations LPC fishery requirements by the content of chemical elements in the waters of the Kogilnik River

Показник	Ймовірність перевищення ГДК, %								
	Амоній-іони, мг/дм^3	Біохімічне споживання кисню за 5 діб, мгO$_2$/дм^3	Завислі (суспендовані) речовини, мг/дм^3	Кисень розчинений, мгO$_2$/дм^3	Нітрат-іони, мг/дм^3	Нітрит-іони, мг/дм^3	Сульфат-іони, мг/дм^3	Фосфат-іони (поліфосфати), мг/дм^3	Хлорид-іони, мг/дм^3
Верхній ствір р. Когильник - с. Серпневе	76,3	91,3	91,3	45	56,3	80,0	100	2,5	78,8
Нижній ствір р. Когильник - с.Новоолексіївка.	62,5	73,2	94,6	70	17,9	58,9	100	0,02	98,2

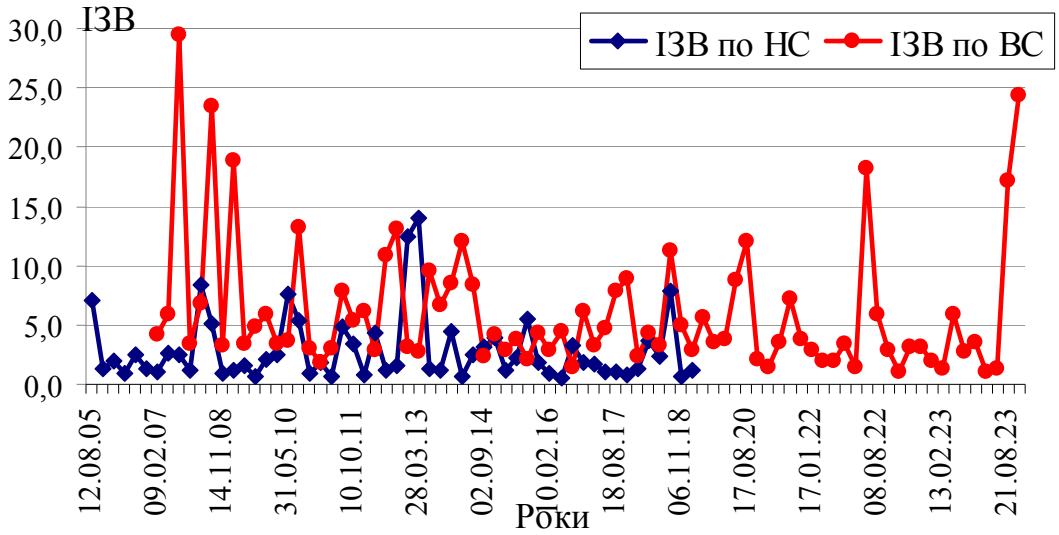


Рис. 8 – Зміна якості води у річці Когильник за методом ІЗВ модифікованим (у окремі дати забору проб), ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 8 – Change in water quality in the Kogilnik River according to the modified IWP method (on separate dates of sampling), BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

Виявлено (табл. 4), що у верхньому створі найбільш ймовірна поява "забруднених" вод, клас IV (емпірична ймовірність p=38,8 %). У нижньому створі найбільш ймовірна поява "помірно забруднених" вод, клас III (p=33,9 %).

Ймовірність попадання у класи з IV по VII (води з порушеними екологічними параметрами) для верхнього створу дорівнює 86,3 %, а для нижнього – лише 44.7 % (рис. 10).

Зниження рівня забруднення у нижньому створі пояснюється процесом біологічного, фізичного та хімічного самоочищення водної екосистеми [29]. Оскільки біогенні речовини мають переважно антропогенне походження, покращення якості води на території України обумовлено меншим надходженням стічних вод до русла річки.

Оцінки ризику забруднення води річки Когильник на основі пробіт-функції були виконані для таких елементів: $БСК_5$, кисень розчинний, амоній-іони, нітрат-іони, нітрит-іони, фосфати). Результати (табл. 5) показали, що у верхньому створі с. Серпневе, (кордон з Молдовою) річка Когильник ризик забруднення досягав рівнів "високий" та "критичний", що згідно таблиці 2 відповідає політрофному та гіпертрофному стану. Ймовірність ризику критичного рівня становить 46,1 %, а високого - 41,1, що в сумі складає 87,2 %. У нижньому створі ймовірність ризику забруднення високого рівня становить 33,3 %, а критичний ризик у роки досліджень не спостерігався. У останні п'ять років установлений клас якості води "задовільний" та "добрий", із "значним" та "підвищеним" ризиком забруднення, якому відповідає "евтрофний" та "мезотрофнй" стан.

З рисунку 11 добре видно, що за річними значеннями ризиків та ІЗВ верхній та нижній створи утворюють два різних класи. Порівняння показників ризику ER із показниками якості води (ІЗВ модифікованим) дозволили виявити тісний зв'язок між ними (табл. 6).

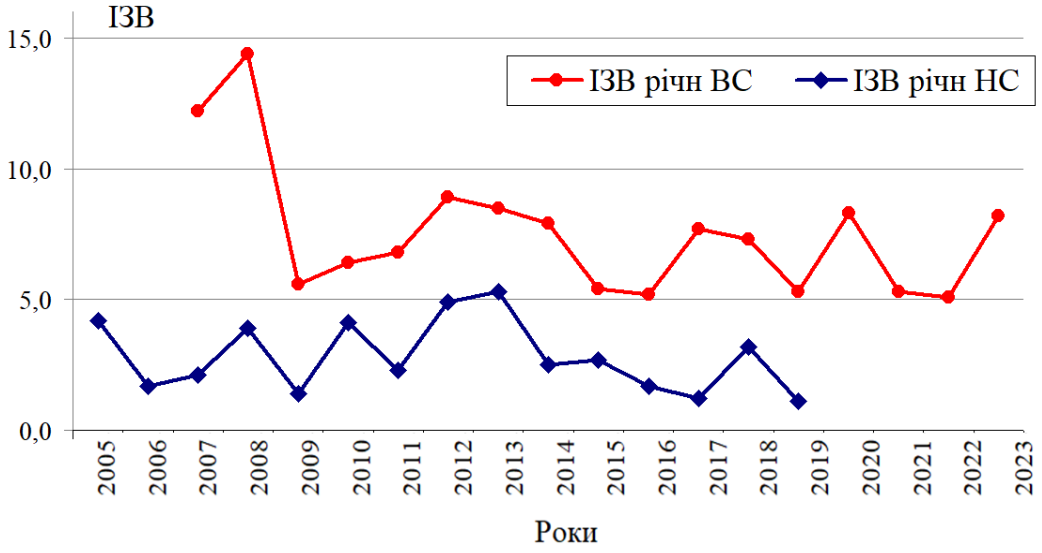


Рис. 9 – Зміна якості води у річці Когильник за методом ІЗВ модифікованим осереднені за рік, ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 9 – Change in water quality in the Kogilnik River according to the modified IWP method annual average, BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

Таблиця 4 – Емпірична ймовірність появи різних класів якості води у р. Когильник
Table 4 – Empirical probability of occurrence of different classes of water quality in the Kogilnik River

Клас якості за ІЗВ	I дуже чисті	II чисті	III помірно забруднені	IV забруднені	V брудні	VI дуже брудні	VII надзвичайно брудні
Верхній ствір р. Когильник							
Загальна кількість випадків (всього 80 проб)	0	1	10	31	14	11	13
Емпірична частота події, %	0	1,3	12,5	38,8	17,5	13,7	16,3
Нижній ствір р. Когильник							
Загальна кількість випадків (всього 56 проб)	0	12	19	13	6	4	2
Емпірична частота події, %	0	21,4	33,9	23,2	10,7	7,2	3,6

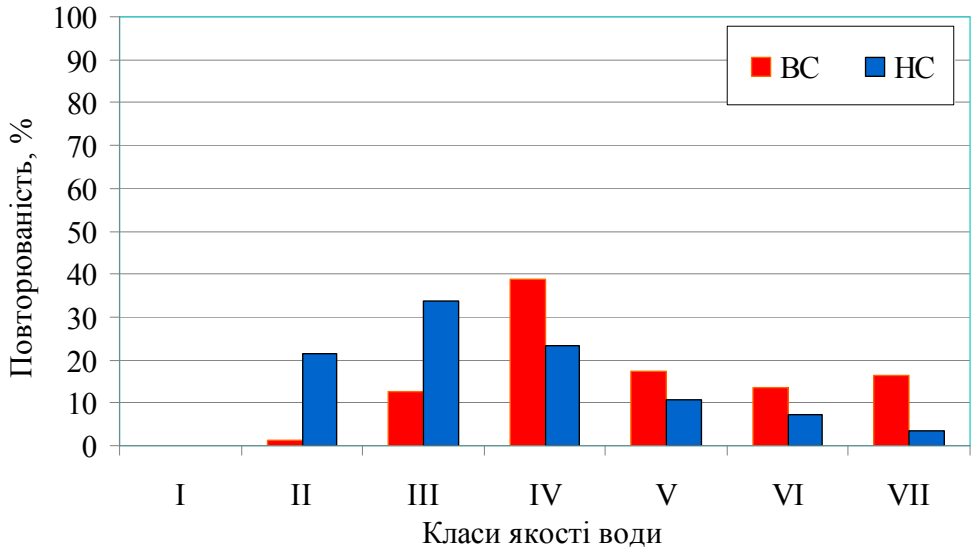


Рис. 10 – Ймовірність попадання розрахованих індексів забруднення води у різні класи класів якості у р. Когильник, ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 10 – The probability of the calculated indices of water pollution falling into different classes of quality classes in the Kogilnik River, BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

Таблиця 5 – Оцінка якості води, ступеня ризику р. Когильник за показником *Probit*
Table 5 – Assessment of water quality, degree of risk of the Kohylnyk River according to the *Probit* indicator

Роки	**Prob річн**	**ER річн**	**Клас якості води**	**Якісна оцінка ризику**
ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с Серпневе, кордон з Молдовою				
2007	1,28	0,901	V-поганий	критичний
2008	1,61	0,946	V-поганий	критичний
2009	0,80	0,788	IV - незадовільний	високий
2010	0,75	0,773	IV - незадовільний	високий
2011	1,00	0,841	V-поганий	критичний
2012	1,12	0,866	V-поганий	критичний

Таблиця 5 – Продовження
Table 5 – Continued

Роки	Prob річн	ER ічн	Клас якості води	Якісна оцінка ризику
2013	1,16	0,563	III - задовільний	значний
2014	1,05	0,855	V-поганий	критичний
2015	0,51	0,695	IV - незадовільний	високий
2016	0,55	0,709	IV - незадовільний	високий
2017	1,08	0,858	V-поганий	критичний
2018	0,85	0,802	V-поганий	критичний
2019	0,71	0,761	IV - незадовільний	високий
2020	1,02	0,846	V-поганий	критичний
2021	0,58	0,719	IV - незадовільний	високий
2022	0,46	0,677	IV - незадовільний	високий
2023	0,79	0,785	IV - незадовільний	високий
НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка				
2005	0,46	0,677	IV - незадовільний	високий
2006	-0,17	0,433	III - задовільний	значний
2007	0,04	0,516	III - задовільний	значний
2008	0,35	0,637	IV - незадовільний	високий
2009	-0,36	0,360	II – добрий	підвищений
2010	0,49	0,688	IV - незадовільний	високий
2011	-0,07	0,472	III - задовільний	значний
2012	0,49	0,688	IV - незадовільний	високий
2013	0,53	0,702	IV - незадовільний	високий
2014	0,12	0,548	III - задовільний	значний
2015	0,19	0,575	III - задовільний	значний
2016	-0,29	0,391	II – добрий	підвищений
2017	-0,48	0,316	II – добрий	підвищений
2018	0,20	0,579	III - задовільний	значний
2019	-0,47	0,320	II – добрий	підвищений

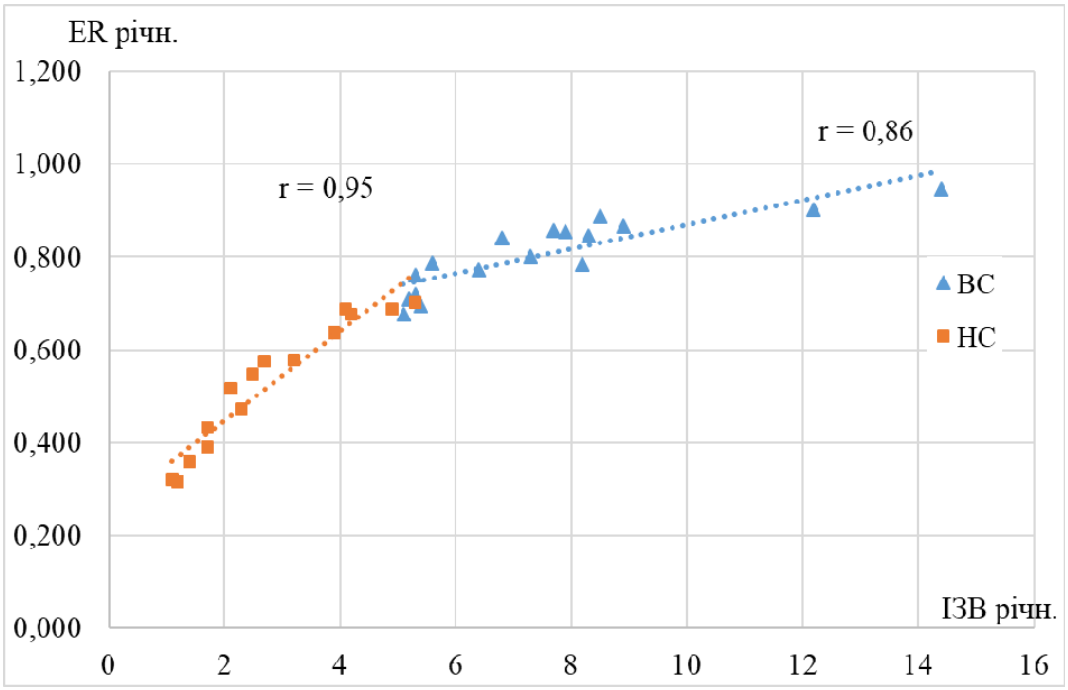


Рис. 11 – Залежність показників ризику *ER* від індексів забруднення води модифікованих (середньорічних), ВС - верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою; НС - нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка

Fig. 11 - Dependence of ER risk indicators on modified water pollution indices of water (annual average), BC - the upper body of the Kogilnik River, 131 km from the mouth, village. Serpneve, border with Moldova; HC - the lower body of the Kogilnik River, 12 km from the mouth, village Novooleksiivka

Таблиця 6 – Рівняння лінійної парної регресії для опису зв'язків між показниками ризику Probit та якістю води р. Когильник

Table 6 – Linear pairwise regression equation for describing the relationship between Probit risk indicators and water quality of the Kogilnik River

Вид рівняння	Коефіцієнт кореляції	Вихідні дані
Верхній ствір р. Когильник, 131 км від гирла, с. Серпневе, кордон з Молдовою		
$ER = 0{,}0261 \cdot ИЗВ + 0{,}609$	0,86	Річні значення
$ER = 0{,}2185 \cdot \ln ИЗВ + 0{,}419$	0,91	Добові значення
Нижній ствір р. Когильник, 12 км від гирла, с. Новоолексіївка		
$ER = 0{,}0963 \cdot ИЗВ + 0{,}255$	0,95	Річні значення
$ER = 0{,}3086 \cdot \ln ИЗВ + 0{,}299$	0,99	Добові значення

4 ВИСНОВКИ

1. Установлена висока ймовірність перевищення ГДК за вмістом біогенних елементів, які містяться у водах річки Когильник. Виявлено, що найбільші концентрації біогенних речовин спостерігались у верхній течії річки, на границі з Молдовою.

2. На основі розрахунків модифікованого індексу забруднення води (ІЗВ) з використанням біогенних елементів виявлено, що у верхньому створі найбільш ймовірна поява "забруднених" вод, клас IV (емпірична ймовірність p=38,8 %). У нижньому створі найбільш ймовірна поява "помірно забруднених" вод, клас III (p=33,9 %). Ймовірність попадання у класи з IV по VII (води з порушеними екологічними параметрами) для верхнього створу дорівнює 86,3 %, а для нижнього – лише 44,7 %.

3. Виявлено існування тісного зв'язку між індексами забруднення води та показниками екологічних ризиків, розрахованих за пробіт-функцією.

4. Показано, що оцінки забруднення біогенними елементами для верхнього та нижнього створів річки Когильник утворюють два різних класи, причому ризик забруднення у верхньому створі значно вищий, ніж у нижньому.

5. Виконані оцінки ризику забруднення води річки Когильник біогенними елементами дозволили установити, що у верхньому створі (с. Серпневе, кордон з Молдовою) для річки Когильник ризик забруднення досягав рівнів "високий" та "критичний". Ймовірність ризику критичного рівня становить 46,1 %, а високого – 41,1, що в сумі дорівнює 87,2 %. У нижньому створі ймовірність ризику забруднення високого рівня становить 33,3 %.

6. Зниження рівня забруднення біогенними елементами у нижньому створі пояснюється процесами біологічного, фізичного та хімічного самоочищення водної екосистеми та зменшенням скидів із сільськогосподарських полів та комунальних споруд.

7. Таким чином, води річки Когильник підлягають забрудненню біогенними елементами, але головні джерела цього забруднення знаходяться поза межами України.

8. Установлено, шо у останні роки забруднення сполуками азоту нижньої течії річки Когильник зменшується, ризик забруднення класифікується як «підвищений» та «значний».

9. Для зменшення забруднення річки Когильник біогенними речовинами як у межах України, так і Молдови необхідно проведення додаткових заходів у вигляді підвищення культури землеробства (наприклад, під час збереження та внесення добрив) з метою забезпечення озера-водосховища Сасик водою задовільної якості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кулібабін О. Г. Концепція подальшого розвитку зрошення на Одещині в умовах економіко-екологічних обмежень : монографія. Одеса : ОДАБА, 2022. 348 с.
2. Tuchkovenko Y., Khokhlov V., Loboda N. Climate change impact on the freshwater balance of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast. *Journal of Water and Climate Change*. 2023. Vol 14(7). Pp. 2416-2431.
3. Вплив змін клімату на гідрологічний і гідроекологічний режими лиманів північно-західного Причорномор'я : монографія / Тучковенко Ю. С., Хохлов В. М., Лобода Н. С., Кушнір Д. В., Серга Е. М.; за ред. Ю. С. Тучковенко. Одеса : Вид-во Одеського державного екологічного університету, 2022. 202 с. http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/10929
4. Блажко А. П. Гідрохімічний режим та екологічний стан

поверхневих вод в басейні річки Когильник Одеської області. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2018. №1 (54). С. 106-120.
5. Довідка для ознайомлення з ситуацією на озері Сасик / Одеська національна наукова бібліотека URL : https://odnb.odessa.ua/img/novini_2021/3194/sas01.pdf (дата звернення 18.11.2023).
6. Природа Одесской области. Ресурсы, их рациональное использование и охрана / под ред. Г. И. Швебса, Ю. А. Амброз. Киев-Одесса : Вища школа, 1979. 144 с.
7. Геологія з основами геоморфології: підручник для студентів екологічних і географічних спеціальностей вищих навчальних закладів / Рудько Г. І., Адаменко О. М., Чепіжко О. В., Крочак М. Д. Чернівці : Букрек, 2010. 400 с.
8. Інформація про р. Когильник. URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/Когильник (дата звернення 04.11.2023).
9. Енциклопедія Сучасної України / ред. кол. І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін.; НАН України, НТШ. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2013. URL : https://esu.com.ua/article-7456 (дата звернення 17.11.2023).
10. Loboda N. S., Tuchkovenko Y. S., Kozlov M. O., Katynska I. V. Assessment of River Water Inflow into the Sasyk Estuary-Reservoir According to RCP4.5 and RCP8.5 Climate Change Scenarios for 2021-2050. *Journal of Geology, Geograph. Geoecology*. 2021. 30 (2). Pp. 315–325. https://doi.org/10.15421/112128.
11. Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) : монографія. Київ : Ніка-центр, 2010. 316 с.
12. Хільчевський В. К., Осадчий В. І., Курило С. М. Регіональна гідрохімія України. Київ : ВПЦ"Київський університет", 2019. 343с.
13. Loboda N., Daus M. Development of a method of assessment of ecological risk of surface water pollution by nitrogen compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol.5 (10(113)). Pp. 15-25. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243058.
14. Методика виділення зон, вразливих до забруднення поверхневих і підземних вод нітратними сполуками / Осадча Н. М. та ін. *Український географічний журнал*. 2020. №4 (112). С. 38–48. https://doi.org/10.15407/ugz2020.04.038.
15. Лобода Н. С., Отченаш Н. Д., Федіна Н. О. Розроблення методичного підходу до визначення екологічних ризиків забруднення водних об'єктів у межах індустріально розвинутих територій (на прикладі річок міста Харків). *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. №31. С. 88-102. https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.06
16. Finney D. Probit analysis: a statistical treatment of the sigmoid response curve. Cambridge University Press, Cambridge, 1952. 256 p.
17. Rybalova O., Artemiev S. Development of a procedure for assessing the ecological risk of the surface water status deterioration. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 5(10-89). pp. 67-76. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112211.
18. Rybalova O., Artemiev S., Yermakovych I., Korobkova H., Kyrpychova I. Determination of the Ecological Risk of Deterioration in the Water Flow of the Udy River Basin of Kharkiv Region, Ukraine. *11th Eastern European Young Water Professionals Conference IWA YWP*, 1-5 October. Prague, Czech Republic, 2019.
19. Дані моніторингу та екологічної оцінки водних ресурсів України Державного агента водних ресурсів України URL : http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index (дата звернення 17.10.2023).
20. Сніжко С. І. Оцінка та прогнозування якості природних вод. Київ : Ніка-Центр, 2001. 264 с.
21. Юрасов С. М., Сафранов Т. А., Чугай А. В. Оцінка якості природних вод: навчальний посібник. Одеса : Екологія, 2012. 168 с.
22. Хільчевський В. К., Забокрицька М. Р. Хімічний аналіз та оцінка якості природних вод: навчальний посібник. Луцьк : Вежа друк, 2021. 76 с.
23. The Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA) : Water. 2016. URL : http://www.oehha.ca.gov/water.html (Accessed: 29 November 2023).
24. Risk assessment of hazardous impacts on urbanization and industrialization activities based upon toxic substances / Salem T., Ahmed Sh.S., Hamed M., Abd ElAziz G. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2016. №2 (2). Pp. 163-176. https://doi.org/10.7508/gjesm.2016.02.007.
25. Appraisal of Methodology of Ecological Risks Assessment Arising From Pollution of The Rivers of the Ukraine / Romanenko V. et al. *Part of the series Threats to Global Water Security* / Edited by J. Anthony, A. Jones, Trahel G. Vardanian, Christina Hakopian. 2009. Pp. 323-332.
26. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення: Вид. офіційне. Київ : Твій формат, 2006. 240 с.
27. Мусієнко М. М., Серебряков В. В., Брайон О. В. Екологія. Охорона природи: словник-довідник. Київ : Т-во «Знання», ККО, 2002. 550 с.
28. Хільчевський В. К. Гідрохімічний словник. Київ : DIA, 2022. 208 с.
29. Романенко В. Д. Основи гідроекології : підручник. Київ : Обереги, 2001. 728 с.

REFERENCES

1. Kulibabin, O.H. (2022). *Kontseptsiia podalshoho rozvytku zroshennia na Odeshchyni v umovakh ekonomiko-ekolohichnykh obmezhen [The concept of further development of irrigation in Odesa region under conditions of economic and ecological restrictions]*. Odesa : ODABA. (in Ukr.)
2. Tuchkovenko, Y., Khokhlov, V. & Loboda, N. (2023). Climate change impact on the freshwater balance of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast. *Journal of Water and Climate Change*, vol. 14(7), pp. 2416-2431.
3. Tuchkovenko, Y., Khokhlov, V., Loboda, N. et al. (2022). *Vplyv zmin klimatu na hidrolohichnyi i hidroekolohichnyi rezhymy lymaniv pivnichno-zakhidnoho Prychornomoria [Climate change impact on hydrological and hydroecological regimes of lagoons on the North-Western Black Sea coast]*. Odesa : Odessa State Environmental un-ty Publ. http://eprints.library.odeku.edu.ua/ id/eprint/10929 (in Ukr.)
4. Blazhko, A. P. (2018). Hidrokhimichnyi rezhym ta ekolohichnyi stan poverkhnevykh vod v baseini richky Kohylnyk Odeskoi oblasti [Hydrochemical regime and ecological state of surface waters in the basin of the Kogylnyk River, Odesa Region]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu,* №1 (54), pp. 106-120.
5. *Dovidka dlia oznaiomlennia z sytuatsieiu na ozeri Sasyk*

[Reference for familiarization with the situation at Lake Sasyk]. Odesa National Scientific Library. Available at: https://odnb.odessa.ua/img/novini_2021/3194/sas01.pdf (Accessed: 18 November 2023). (in Ukr.)

6. Shvebs, H. I. & Ambroz, Yu. A. (eds). (1979). *Priroda Odesskoy oblasti. Resursy, ikh ratsional'noe ispol'zovanie i okhrana [Nature of the Odessa region. Resources, their rational use and protection]*. Kiev-Odessa : Publ. of Vyshcha shkola. (in Russ.)
7. Rudko, H.I., Adamenko, O.M., Chepizhko, O.V. & Krochak, M.D. *Heolohiia z osnovamy heomorfolohii [Geology with the basics of geomorphology]* (2010). / Chernivtsi : Publ. of Bukrek. (in Ukr.)
8. *Informatsiia pro r. Kogilnik [Information about Kogilnik River]*. Available at: https://uk.wikipedia.org/wiki/Kogilnik (Accessed: 04 November 2023) (in Ukr.)
9. Dziuba, I.M., Zhukovskyi, A.I., Zhelezniak, M.H. (2013). *Entsyklopediia Suchasnoi Ukrainy [Encyclopedia of Modern Ukraine]*. NAN Ukrainy, NTSh. Kyiv : Institute of Encyclopedic Research of National Academy of Science of Ukraine . Available at: https://esu.com.ua/article-7456 (Accessed:17 November 2023).
10. Loboda, N.S., Tuchkovenko, Y.S., Kozlov, M.O. & Katynska, I.V. (2021). [Assessment of River Water Inflow into the Sasyk Estuary-Reservoir According to RCP4.5 and RCP8.5 Climate Change Scenarios for 2021-2050]. *Zhurnal heolohiia, heohrafiia, heoekolohiia [Journal of Geology, Geograph. Geoecology]*, 30 (2), pp. 315–325. https://doi.org/10.15421/112128.
11. Grebin, V.V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrayiny (landshaftno-hidrolohichnyi analiz) [The modern water conditions of Ukrainian rivers (landscape-hydrological analysis)]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
12. Khilchevskyi, V.K., Osadchyi, V.I. & Kurylo, S.M. (2019). *Rehionalna hidrokhimiya Ukrayiny [Regional hydrochemistry of Ukraine]*. Kyiv : "Kyiv University". (in Ukr)
13. Loboda, N. & Daus, M. (2021). Development of a method of assessment of ecological risk of surface water pollution by nitrogen compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* vol.5, №10(113): Ecology, pp. 15-25. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243058.
14. Osadcha, N. M. et al. (2020). Metodyka vydilennia zon vrazlyvykh do zabrudnennia poverkhnevykh i pidzemnykh vod nitratnymy spolukamy [Methodology for identifying zones vulnerable to pollution of surface and underground waters by nitrate compounds]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 4 (112), pp. 38–48. https://doi.org/10.15407/ugz2020.04.038. (in Ukr.)
15. Loboda, N.S., Otchenash, N.D. $ Fedina, N.O. (2023). [Development of a methodological approach for determination of environmental risks of water bodies pollution across industrially developed territories (as exemplified by the rivers of city of Kharkiv)]. *Ukraïns'kij gìdrometeorologìčnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 31, pp. 88-102. https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.06 (in Ukr.)
16. Finney, D. (1952). *Probit analysis: a statistical treatment of the sigmoid response curve.* Cambridge University Press, Cambridge.
17. Rybalova, O. & Artemiev, S. (2017). Development of a procedure for assessing the ecological risk of the surface water status deterioration. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies,* 5(10-89), pp. 67-76. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112211.
18. Rybalova, O., Artemiev, S., Yermakovych, I., Korobkova, H. & Kyrpychova, I. (2019). Determination of the Ecological Risk of Deterioration in the Water Flow of the Udy River Basin of Kharkiv Region, Ukraine. *11 th Eastern European Young Water Professionals Conference IWA YWP*, 1-5 October, Prague, Czech Republic.
19. *Data on monitoring and environmental assessment of water resources of Ukraine of the State Water Resources Agency of Ukraine [Dani monitorynhu ta ekolohichnoi otsinky vodnykh resursiv Ukrainy Derzhavnoho ahenstva vodnykh resursiv Ukrainy]*. Available at: http://monitoring.davr.gov.ua/EcoWaterMon/GDKMap/Index (Accessed:17 October 2023). (in Ukr.)
20. Snizhko, S.I. (2001). *Otsinka ta prohnozuvannia yakosti pryrodnykh vod [Evaluation and forecasting of the quality of natural waters]*. Kyiv : Nika-Tsentr. (in Ukr.)
21. Iurasov, S.M., Safranov, T.A. & Chuhai, A.V.(2012). *Otsinka yakosti pryrodnykh vod* [*Assessment of the quality of natural waters]*. Odesa: Ekolohiia. (in Ukr.)
22. Khilchevskyi, V.K. & Zabokrytska, M.R. (2021). *Khimichnyi analiz ta otsinka yakosti pryrodnykh vod [Chemical analysis and assessment of the quality of natural waters]*. Lutsk: Vezha druk. (in Ukr.)
23. *The Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA) : Water. 2016.* Available at: http://www.oehha.ca.gov/water.html (Accessed: 29 November 2023).
24. Salem, T. et al. (2016). Risk assessment of hazardous impacts on urbanization and industrialization activities based upon toxic substances. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2 (2), pp. 163-176. https://doi.org/10.7508/gjesm.2016.02.007.
25. Romanenko, V. et al. (2009). Appraisal of Methodology of Ecological Risks Assessment Arising From Pollution of The Rivers of the Ukraine. In: J. Anthony, A. Jones, Trahel G. Vardanian and Christina Hakopian (eds). *Part of the series Threats to Global Water Security,* pp. 323-332.
26. *Vodna Ramkova Dyrektyva YeS 2000/60/IeS. Osnovni terminy ta yikh vyznachennia [EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Basic terms and their definitions]*. (2006). (in Ukr).
27. Musiienko, M.M., Serebriakov, V.V. Braion, O.V. (2002). *Ekolohiia. Okhorona pryrody [Ecology. Nature protection]*. Kyiv : Znannia Publ. (in Ukr)
28. Khilchevskyi, V.K. (2022). *Hidrokhimichnyi slovnyk [Hydrochemical dictionary]*. Kyiv : DIA Publ. (in Ukr)
29. Romanenko, V.D. (2001). *Osnovy hidroekolohii [Basics of hydroecology]*.Kyiv : Oberegy Publ. (in Ukr)

ENVIRONMENTAL RISKS ASSESSMENT OF THE KOGYLNYK RIVER NUTRIENT POLLUTION BASED ON PROBIT FUNCTIONS

N. S. Loboda, A. M. Kuza

Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine,
natalie.loboda@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0794-9951

The relevance of the study is associated with the need to determine the risks of high and catastrophic levels of water pollution of the Kogylnyk River. The water quality of this river affects the environmental condition of the northern part of Sasyk lake and reservoir. This artificial reservoir that was created as part of the estuary used to be one of components of the Danube-Dniester irrigation system in the past and can be used for irrigation in the post-war period in the future. As the North-Western Black Sea region is an agricultural region of Ukraine, the article focuses on the pollution of the river by specific nutrients (ammonium, nitrite, nitrate, phosphate). The subject of the study covers the environmental risks assessment of the Kogylnyk River present-day pollution. Hydrochemical observations of the State Water Resources Agency of Ukraine were used as input materials of the research. Such observations were carried out across the upper (below the border with the Republic of Moldova) and lower sections of the river. The number of samples taken in the upper section was 80, and 56 – in the lower section. Water quality was assessed using a modified water pollution index (WPI). The risks of nutrient pollution were evaluated based on a statistical approach using a probit function. It was found that the water quality in the upper section is worse than the one in the lower section. The research indicated a close correspondence between water quality indicators and environmental risk values. In the upper section, the risks of catastrophic pollution have a probability of their occurrence that is equal to 46.1%, and the risks of high pollution – 41.1%, with 87.2% constituting a total percentage. In the lower section, the probability of a high level pollution risk is equal to 33.3%, with no critical risk identified during the observation period. The trophic status of the water body along the river length varies from hypertrophic and polytrophic on the upper course to eutrophic and mesotrophic on the lower course. The decrease in pollution levels in the river's lower section is due to the processes of biological, physical and chemical self-purification of the aquatic ecosystem. Since nutrients have a predominantly anthropogenic origin, the water quality improvement of the Kogylnyk River across the territory of Ukraine is associated with the reduced flow of municipal and agricultural wastewater entering the river. Nutrient pollution requires implementation of additional measures such as improving the culture of farming taking place in the catchment area (for example, during conservation of fertilizers and their application).

Keywords: environmental risks of pollution; probit functions; nutrients; the Kogylnyk River; Sasyk lake and reservoir.

Подання до редакції **: 11. 12. 2023**
Надходження остаточної версії **: 16. 12. 2023**
Публікація статті : **21. 12. 2023**

Ukrainian hydrometeorological journal, ***2023****, 32, 50-62* doi: 10.31481/uhmj.32.2023.04
ISSN 2311-0902 (print), 2616-7271 (online)

УДК 556.161

ЗАКОНОМІРНОСТІ КОЛИВАНЬ СТОКУ РІЧКИ ДНІСТЕР (УКРАЇНА) В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ПОЧАТКУ XXI СТОРІЧЧЯ

Н. С. Лобода, М. Р. Розвод

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
natalie.loboda@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0794-9951

Актуальність обраної теми обумовлена впливом змін клімату на коливання водності річок України. Наслідки потепління залежать від фізико-географічних умов і суттєво розрізняються у різних природних зонах. Реакція водозборів на зміни клімату змінюється в залежності від ландшафту (гірська або рівнинна місцевість) та широти місцевості, що призводить до нестійкості меж районів із синхронними та синфазними коливаннями річного стоку. Метою дослідження є встановлення закономірностей коливань річного стоку в басейні Дністра у їх зв'язку із коливаннями максимального стоку дощових паводків та весняних водопіль. Саме весняні водопілля визначають значну частину об'єму річного стоку і залежать від впливу потепління у зимовий сезон на снігове живлення річки. Метод побудови різницевих інтегральних кривих річного, максимального дощового та максимального весняного стоку та їх аналіз є основним у даному дослідженні. У межах водозбору річки Дністер за видом різницевих інтегральних кривих річного стоку виділено 7 груп (районів) із синхронними або синфазними коливаннями. Співставлення коливань річного, максимального дощового та весняного стоку відбувалося за осередненими у межах кожної групи кривими. Ступінь синхронності або синфазності коливань оцінювався за коефіцієнтами кореляції між ординатами різницевих інтегральних кривих. Установлено, що циклічність коливань головної річки зберігається по всій її довжині, навіть нижче Дністровської ГЕС. Останній перехід у маловодну фазу відбувся у 2010-2011 роках. Виявлено, що встановлена для головної річки циклічність обумовлена, головним чином, коливаннями стоку гірських карпатських приток, які утворюють зону формування стоку Дністра. Ця частина водозбору характеризується високим внеском снігового та дощового живлення річки, але роль дощового живлення переважає. У верхів'ях карпатських річок, де вплив потепління ще недостатньо виражений на значних висотах, весняне водопілля відіграє головну роль у формуванні стоку. У верхів'ях карпатських річок виділено додатковий район, де коливання річного стоку обумовлені як дощовим стоком, так і весняним водопіллям. Межі району 2 можуть змінюватися в результаті посилення наслідків потепління високо у горах. На лівобережних притоках коливання стоку у районах Верхньоподільський та Середньоподільський циклічність коливань стоку є близькою до коливань головної річки, але виявлений зсув дат останнього переходу у маловодну фазу. Указано на можливість існування впливу карсту та штучних водойм. Установлено суттєву відмінність у характері коливань стоку верхніх лівобережних приток (Стрв'яж, Верещиця, Щерек) та нижніх лівобережних приток, які знаходяться під впливом інших атмосферних процесів та відповідних їм кліматичних чинників.

Ключові слова: циклічність коливань стоку; річний стік; весняне водопілля; дощові паводки; районування.

1 ВСТУП

Актуальність роботи обумовлена зміною умов формування стоку в басейні річки Дністер внаслідок змін глобального та регіонального клімату [1] і практичною необхідністю відстежувати реакцію водозборів річок та водних екосистем на ці зміни [2]. Водозбір річки Дністер має значну протяжність з північного заходу на південний схід України і проходить через декілька географічних зон. Середня багаторічна зміна витрат паводків/повеней за кожне десятиріччя в Українських Карпатах дорівнює 0-5%, а на території Північно-Західного Причорномор'я (нижня течія Дністра) досягає "мінус" 12%. [3]. Проблема полягає у тому, щоб установити закономірності коливань стоку і основні тенденції щодо його змін в басейні Дністра як на головній річці, так і притоках на початку XXI сторіччя та виявити причини цих змін. Адаптація до змін клімату,

охорона та раціональне використання водних ресурсів є стратегічними задачами розвитку Дністра як транскордонної річки [4]. Виявлення основних тенденцій у коливаннях стоку в басейні Дністра потребує вирішення питання щодо зміни внеску дощових паводків та весняного водопілля у формування стоку як гірських, так і рівнинних приток, а також головної річки.

Об'єктом дослідження є закономірності коливань характеристик стоку в умовах кліматичних змін.

Предметом дослідження є оцінка закономірностей коливань річного стоку в басейні річки Дністер внаслідок зміни кліматичних умов формування стоку.

Метою дослідження є установлення закономірностей коливань річного стоку в басейні Дністра у їх зв'язку із коливаннями максимального стоку дощових паводків та водопіль.

Опис об'єкта та предмету дослідження. Басейн річки Дністер за умовами живлення, орографічними та кліматичними особливостями поділяється на три частини: Карпатську, Волино - Подільську та Нижню Південну частини [5]. Згідно із ландшафтно-гідрологічним районуванням, у якому ураховуються тепло- та вологозабезпеченість територій, орографічні елементи та морфоструктурні утворення, басейн річки Дністер знаходиться у чотирьох ландшафтно-гідрологічних зонах: Карпатській гірській; Широколистолісовій вологій; Лісостеповій недостатньо зволоженій; Степовій посушливій [6]. Карпатська гірська зона включає до себе Прут-Дністровську ландшафтно-гідрологічну провінцію, до якої входять увійшли правобережні гірські притоки Дністра. Внутрішньорічний розподіл стоку цих річок характеризується значною долею (52-53%) дощового живленням у літньо-осінній сезон (VI-XI). Бузько-Дністровська провінція (широколистолісова волога зона, верхнє лівобережжя) та Дністровько-Дніпровська провінція (Лісостепова недостатньо зволожена зона, середнє лівобережжя) також характеризуються значним дощовим живленням, але поряд із дощовими паводками на річках цих провінцій спостерігаються весняні водопілля, максимуми яких здебільшого перевищують максимуми дощових паводків. Внесок талого стоку весняного сезону становить близько 40% для Бузько-Дністровської провінції та досягає 52% для Дністровсько - Дніпровської провінції. У Причорноморсько - Приазовській провінції степової зони переважає внесок весняного водопілля у формуванні річного стоку.

За гідрологічним районуванням [7] верхня правобережна частина Дністра належить Українським Карпатам, де виділяється Центрально-Карпатська область високої водності та Дністровсько - Прутська область підвищеної водності. Виділені в Українських Карпатах області високої та підвищеної водності відповідають геоморфологічному районуванню згідно із яким в Українських Карпатах виділяються Передкарпатська височина, Зовнішня (північно-східна) смуга Карпат (Бескиди, Горгани, Покутсько-Буковинські Карпати) та Вододільно-Верховиньські Карпати), які розрізняються своїм зволоженням. Верхня та середня лівобережні частини водозбору Дністра належать зоні достатньої водності, у межах якої знаходяться Волинська підобласть та Правобережна Дніпровська область. У роботі [8] обидві вказані вище територіальні групи об'єднані в один гідрологічний район, який названий Волино-Подільським або Подільським. Нижня південна течія річки Дністер відноситься до зони недостатньої водності (Причорноморський гідрологічний район).

Зона формування стоку р. Дністер розташована у його верхній частині водозбору, головним чином, у гірській зоні. Основне живлення Дністра є дощовим та сніго-дощовим. Для верхньої правобережної (карпатської) частини Дністра характерні паводки протягом усього року, внаслідок випадання інтенсивних дощів у теплу пору року, сніготанення в горах в період відлиг та загального танення снігового покриву навесні. Весняне водопілля часто проходить декількома хвилями, в останні роки водопілля формується проходить в умовах випадіння весняних дощів на спаді водопілля, в таких випадках водопілля може бути багатомодальним, коли кожен наступний пік може перевищувати перший, обумовлений таненням снігу. Таким чином, Карпатські притоки мають зливовий паводковий характер з весняним водопіллям та літніми й осінніми дощовими паводками.

На лівобережній стороні Дністра основною частиною рельєфу є Подільська височина. У її межах знаходиться Львівське плато, де залягають неогенові пісковики та вапняки [9]. Подільські притоки характеризуються вираженим весняним водопіллям, але на коливання стоку впливає наявність карсту у земній поверхні. Карстові утворення

обумовлюють існування високої підземної складової сумарного стоку річок. Лише на півдні басейну Дністра водність повністю залежить від коливань талого стоку. Майже все лівобережжя (до річки Ягорлик включно) належить до карстової країни – Північно-Західних схилів Українського кристалічного щита [10].

Огляд літератури. У роботі Горбачової Л.О. зазначається, що "просторово-часові коливання середньорічного стоку води річок добре узгоджуються з просторово-часовими коливаннями річних сум атмосферних опадів" [11]. На основі методів багатовимірного статистичного аналізу (факторний аналіз та метод головних компонент за період сумісних спостережень 1947-1986 рр.) Лободою Н.С. було установлено, що коливання річок басейну Дністра, за виключенням тих, що належать степовій зоні, є синфазними і вони утворюють так званий Західний район [12]. Було доведено, що коливання річного стоку верхніх лівобережних приток Дністра є синхронними (до річки Стрипа включно). Також була виявлена синхронність коливань стоку на лівобережних притоках Дністра, які належать до Дністровсько-Дніпровської лісостепової провінції. Було визнано, що коливання стоку карпатських приток (Карпатський район) та лівобережних приток Верхнього Дністра також є синхронними. Із збільшенням тривалості даних спостережень по річному стоку за різні розрахункові періоди (1953-1982рр. та 1983-2010рр.) у роботі [13] був зроблений висновок, що характер коливань річного стоку та межі районів із синхронними коливаннями стоку можуть змінюватись. Зокрема, було встановлено, що порушилася синхронність коливань річного стоку у Карпатському районі та верхніх лівобережних притоках Дністра. Ця обставина пояснювалася наслідками впливу змін клімату на гірських, передгірських та рівнинних територіях [14]. Рівнинні та передгірські водозбори виявилися більш чутливими до зростання температур повітря у холодний сезон, оскільки їх стік у значній мірі визначається накопиченими запасами води у сніговому покриві і може впливати на формування максимумів та шарів стоку у період формування весняного водопілля [15]. У роботі [16] відзначається, що "спадаюча фаза циклічних коливань максимальних запасів води в снігу та суми від'ємної температури повітря за зимовий період, починаючи з 70-х років XX століття, призводять до зменшення максимальних витрат води весняного водопілля рівнинних річок". У роботі авторів [17] показано, що на гірських водозборах (Карпатський район) у період потепління зростає роль дощових паводків, кількість та інтенсивність яких збільшується, а внесок талого стоку зменшується. За рахунок зростання внеску дощових паводків у формування сумарного стоку наслідки змін клімату менш помітні. Окрім того, у горах із зростанням висоти збільшення температур повітря через глобальне потепління не так добре виражене як на рівнині [18]. У роботі Вишневського В.І. також відзначається зменшення стоку річок Карпат у період проходження весняного водопілля [19]. Слід зазначити, що наслідки потепління у зимовий сезон не проявляються у формуванні стоку до тих пір, поки температури зимових місяців не перейдуть у додатну область своїх значень.

У роботі [20] на прикладі порівнянь водозборів Прут та Тиса звертається увага на велику роль висоти та відносної площі, зайнятої значними висотами, а також на вплив форми водозборів та розташування схилів відносно навітряної та підвітряної сторін. Зазначається, що при витягнутості водозборів уздовж Карпатських гір виникає більше можливостей для накопичення вологи, ніж це можливо для водозборів, що тягнуться із заходу на схід. Ця обставина знайшла своє підтвердження під час відокремлення Зовнішньокарпатського та Східнокарпатського районів із синхронними коливаннями стоку, про що йшлося в [21]. Таким чином, можна відзначити, що на багатьох річках України змішаного живлення за рахунок потепління відбуваються зміни у генетичному походженні річного стоку, що може вплинути на характер багаторічних коливань стоку. Зменшення весняного стоку рівнинних річок підчас зростання температур повітря зимового сезону також здатне вплинути на характер коливань річного стоку.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У роботі використані дані гідрологічних спостережень на діючих гідрологічних постах, які розташовані на водозборі р. Дністер у межах України. Максимальна тривалість спостережень становить 72 роки (1945-2021 рр.). Використані дані по річному, максимальному стоку весняного водопілля та максимальному стоку дощових паводків за теплий період року. Оскільки на багатьох річках басейну Дністра початок спостережень припадає на 50 – ті роки минулого сторіччя, при розрахунках

осереднених різницевих інтегральних кривих та коефіцієнтів кореляції використовувалися ряди з єдиним періодом спостережень, наприклад, 1958-2018 рр.

Основним методом досліджень є метод різницевих інтегральних кривих [22]. Найчастіше в практиці гідрологічних розрахунків для виділення фаз і циклів водності використовуються різницеві інтегральні криві, ординати яких являють собою послідовне накопичення відхилень величин стоку від середнього значення. Порівняння кривих легше виконувати при їх представленні у вигляді безрозмірних, тобто модульних, коефіцієнтів стоку $\left(k_i = q_i / \overline{q} = Q / \overline{Q} = W_i / \overline{W} = Y_i / \overline{Y}\right)$, де q – модуль стоку, Q – витрата, W- об'єм, Y – шар стоку). Середнє багаторічне значення модульного коефіцієнта завжди дорівнює одиниці, отже, поточні ординати різницевої інтегральної кривої на кінець t-го року від початку побудування кривої визначають за рівнянням

$$\sum_{i=1}^{t}(k_i - 1) = f(t), \qquad (1)$$

де k_i - модульний коефіцієнт.

Відхилення середнього значення величини (модульного коефіцієнта) за будь – який інтервал часу m від його середнього значення за багаторічний період спостережень, який дорівнює одиниці, характеризується тангенсом кута нахилу лінії, яка поєднує точки початку та кінця інтервалу, до горизонтальної прямої і визначається за формулою

$$tg\alpha = (k_i - 1)_{сер} = \frac{l_k - l_n}{m} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(k_i - 1) - \sum_{i=1}^{n-m}(k_i - 1)}{m} = \frac{\sum_{i=1}^{m}(k_i - 1)}{m}, \qquad (2)$$

де l_k, l_n - відповідно кінцева та початкова ординати інтегральної кривої для періоду часу, який розглядається; m – число років у періоді часу.

Період часу, для якого ділянка інтегральної кривої має нахил вверх відносно осі абсцис та значення $(k_i - 1)_{сер}$ додатне (переважають додатні відхилення від середнього), відповідає багатоводній фазі коливань стоку. Період, для якого з'єднуюча лінія і відповідна ділянка нахилені вниз та $(k_i - 1)_{сер}$ має від'ємне значення, відповідає маловодній фазі. Для одного виділеного циклу, який складається із однієї багатоводної та однієї маловодної фаз, середнє значення модульного коефіцієнта $k_{сер}$ дорівнюватиме 1, для багатоводної фази $k_{сер}$ більше за 1, для маловодної – менше за 1. Сума $\sum_{i=1}^{m}(k_i - 1) = 0$ для одного або декількох циклів. Ступінь відповідності коливань різницевих інтегральних кривих оцінювалась за допомогою коефіцієнтів кореляції між ординатами самих кривих. Якщо коефіцієнт кореляції більше або дорівнює 0,7, то це говорить про синхронність коливань досліджуваної характеристики. Якщо коефіцієнт кореляції змінюється в інтервалі від 0,4 до 0,7, то це свідчить про синфазність коливань.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

За видом різницевих інтегральних кривих коливань річного стоку, на водозборі виділено сім угрупувань. Три із них розташовані в районі Українських Карпат, чотири - на лівобережжі (рис. 1). Кількість угрупувань відповідає районам, виділеним на основі кластерного аналізу в роботі [23]. З метою установлення загальних рис коливань стоку для кожного угрупування було отримано осереднену інтегральну криву. Оскільки річний стік Дністра формується як за рахунок весняних водопіль, так і за рахунок дощових паводків, було досліджено особливості багаторічних коливань витрат максимального стоку весняного водопілля та максимального стоку дощових паводків теплого періоду. Співставлення характеру коливань річного, максимального весняного та максимального дощового стоку виконано за осередненими інтегральними кривими.

Виявлено, що коливання річного стоку головної річки (Дністер) у період 1945-2018рр. містять у собі декілька циклів водності (рис. 2). Характерними точками або точками перегину є 1964, 1981-1982, 1995 та 2010 роки. Якщо виділяти цикли коливань водності за характерними точками, то можна стверджувати, що перший цикл тривав з 1945 по 1981 рік включно. Другий цикл розпочався у 1982 році і тривав до 2010 року включно. Перша маловодна фаза тривала з початку спостережень (1945) до

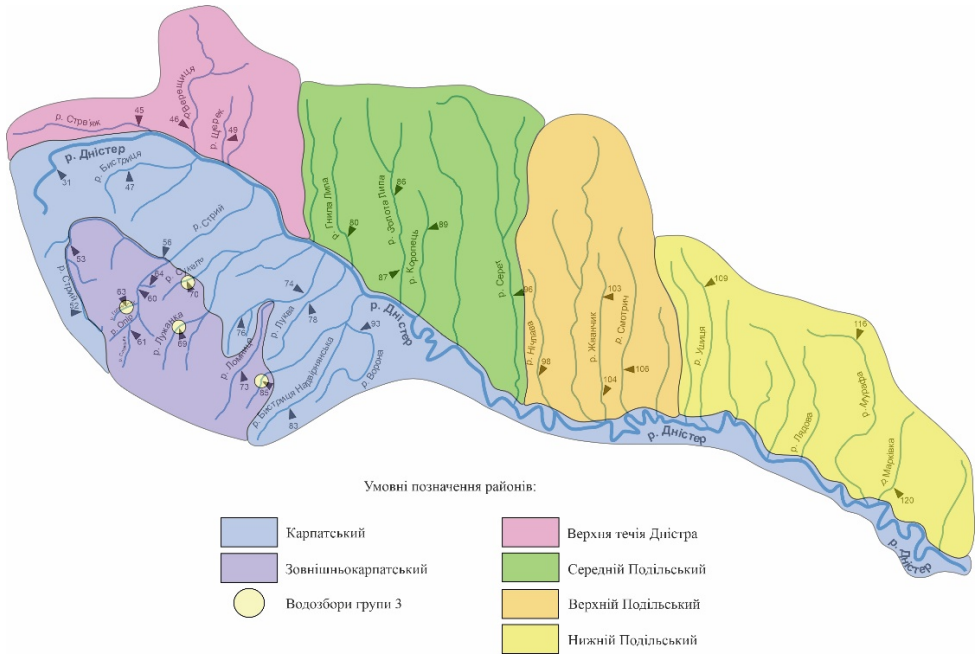


Рис. 1 – Карта-схема районів із синхронними коливаннями річного стоку
Fig. 1 – Map diagram of districts with synchronized fluctuations in annual runoff

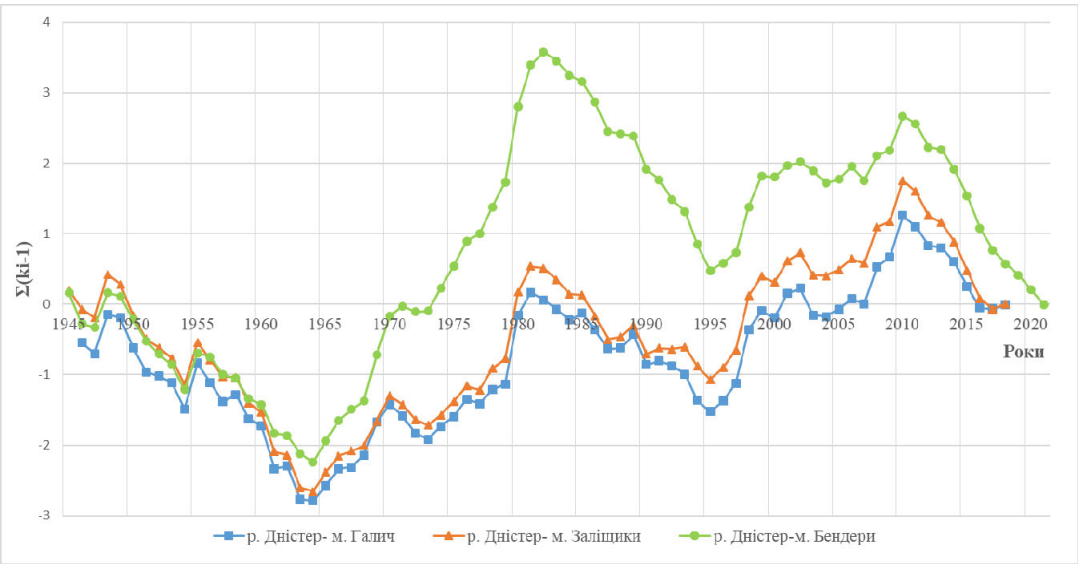


Рис. 2 – Різницеві інтегральні криві річних витрат води за період 1945-2021 рр. у створах, розташованих вище Дністровського водосховища (Галич, Заліщики) та нижче міста Бендери
Fig. 2 – Residual mass curves of annual water discharges for the period of 1945-2021 in the gauges located upstream of the Dniester reservoir (Halych, Zalischyky) and downstream of the city of Bender

1964 року включно. Маловодна фаза змінилася багатоводною, яка закінчилася у 1981 році. Наступна маловодна фаза тривала з 1982 до 1995 року включно, після чого змінилася на багатоводну, яка простежувалася до 2010 року. Лише після 2010 року на головній річці установився перехід у маловодну фазу , що суттєво відрізняється від характеру коливань стоку річок центральної та південної Україні, де перехід у маловодну фазу коливань відбувся ще у 1989 році [6].

Більшість річок правобережних приток, які течуть з Українських Карпат, у своїй нижній течії мають таку ж циклічність коливань, як і головна річка (рис. 3). Ці річки утворюють Карпатський район. Саме вони й визначають циклічність коливань стоку Дністра. У роботі [23] було показано, що у період 1963-1982рр. до Карпатського району належали річки Стрв`яж, Верещиця, Щерек, Зубра. У поєднанні

з карпатськими згадані річки утворювали район Верхньодністровський. Під час розгляду даних за 1983-2010 рр. було установлено, що верхні лівобережні притоки відокремилися в іншу групу. Отримані нами результати підтверджують цей висновок (рис. 4). На відміну від головної річки та правобережних (карпатських) приток у коливаннях річок верхнього лівобережжя виділяється лише один цикл водності та немає переходу у маловодну фазу коливань після 2010 року.

Установлено, що верхні течії гірських правобережних приток Дністра також мають певні відмінності у коливаннях стоку головної річки та Карпатського району і утворюють Зовнішньо-Карпатський район (група 2). Як правило, до цього району входять водозбори із площами до 250 км^2 та середніми висотами від 800 до 1000 м. Особливістю коливань цих річок є формування "сплеску водності" на фоні багатоводної фази із максимумом у 2002 році, при чому цей максимум перевищує максимум 2010 року, характерний для річок Карпат.

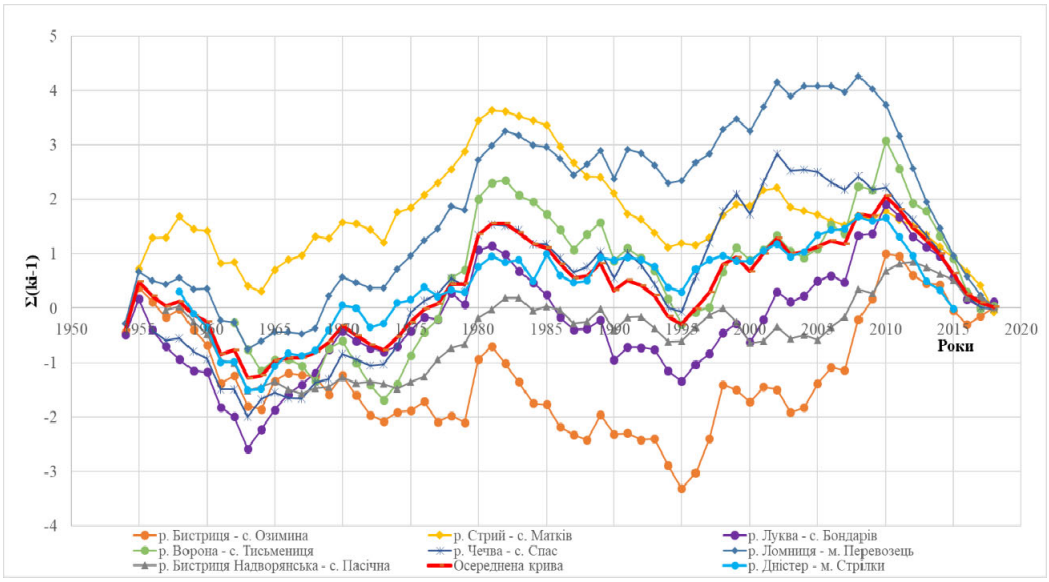


Рис. 3 – Різницеві інтегральні криві річного стоку Карпатського району (група 1) та осереднена інтегральна крива
Fig. 3 – Residual mass curves of the annual runoff in the Carpathian region (group 1) and the averaged residual mass curve

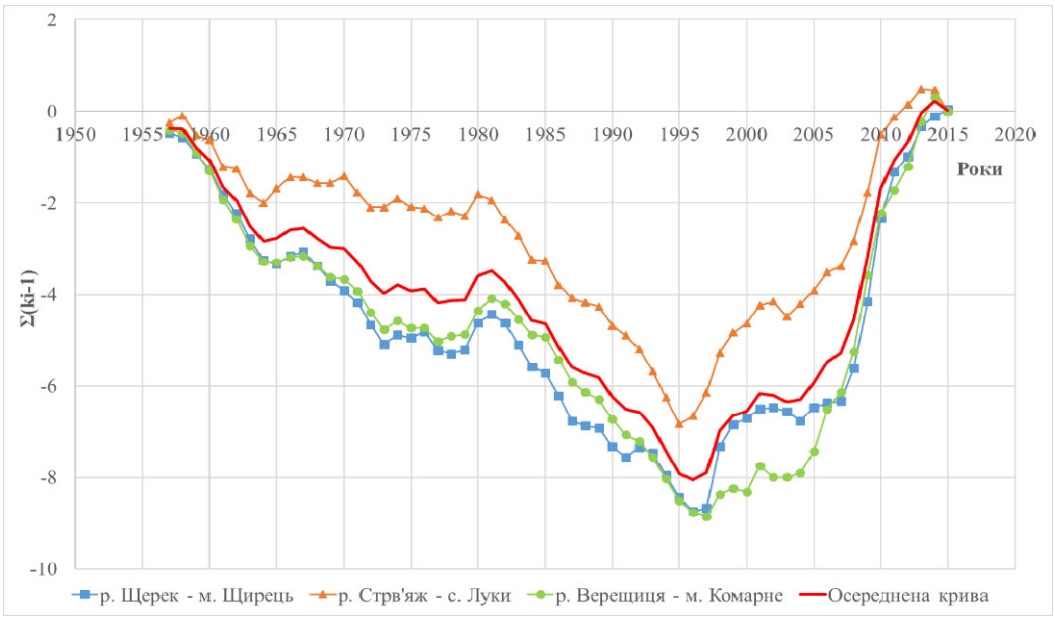


Рис. 4 – Різницеві інтегральні криві річного стоку лівобережних приток у верхній течії Дністра (група 4) та осереднена інтегральна крива
Fig. 4 – Residual mass curves of the annual runoff of the left-bank tributaries in the upper reaches of the Dniester (group 4) and the averaged residual mass curve

У межах групи 2 були виділені окремі водозбори (Головчанка – Тухля, Сукель – Тиса та інші), де характер коливань річного стоку відрізняється від коливань групи 1 і групи 2, що скоріш за все, пов'язане із впливом місцевих чинників, які впливають на формування стоку. Оскільки зміни клімату відбиваються, насамперед, на формуванні максимального стоку весняного водопілля та паводків, був також проведений аналіз різницевих інтегральних кривих коливань характеристик паводків та водопіль.

Висунуто припущення, що причиною наявності відмінностей у характері коливань водності близько розташованих річок та навіть створів, які знаходяться на невеликій відстані на одній і тій самій річці, може бути вплив глобального та регіонального потепління, який по-різному проявляється у різних висотних зонах. Особливо велика різниця виявлена в реакції гірських та рівнинних водозборів на зростання температур повітря у зимовий сезон, яке змінює умови формування та значення стоку у період весняного водопілля [24]. Співставлення осереднених (у межах кожної групи) різницевих інтегральних кривих для річного, максимального весняного та максимального дощового стоку району 1 (Карпатський) надало змогу зробити висновок, що починаючи з 2000 року відповідність коливань річного та весняного максимального стоку порушилась (рис. 5).

Оцінити синхронність чи синфазність коливань різницевих інтегральних кривих можливо за допомогою визначення коефіцієнта кореляції між ординатами цих кривих. Для Карпатського району (група 1) виявлено існування тісного лінійного зв'язку між ординатами кривих річного стоку та ординатами максимального дощового стоку (r=0,67), у той час як тіснота подібного зв'язку для відповідних ординат максимального стоку весняного водопілля оцінюється коефіцієнтом кореляції рівним 0,28 (табл.1).

На основі аналізу суміщених графіків різницевих інтегральних кривих річного стоку, максимального стоку весняних водопіль та дощових паводків (рис. 6) зроблено висновок, що на початку XXI сторіччя на формування стоку водозборів групи 2 більш суттєво впливає весняне водопілля, ніж дощові паводки.

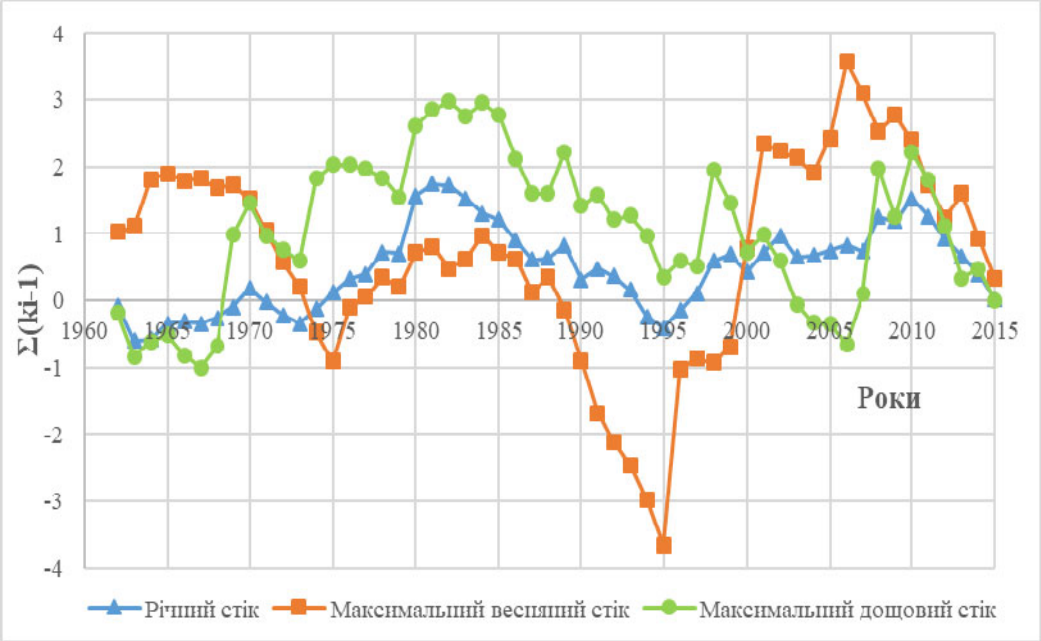


Рис. 5 – Суміщені осереднені різницеві інтегральні криві річного, максимального дощового та максимального весняного (талого) стоку річок Карпатського району (група 1)
Fig. 5 – Combined averaged residual mass curves of annual, maximal rain and maximal spring (melt) runoff of rivers in the Carpathian region (group 1)

Зроблено висновок, що у формуванні коливань річного стоку Зовнішньокарпатського району (група 2) відіграють роль як чинники формування весняного водопілля, так і дощових паводків (коефіцієнти кореляції дорівнюють 0,46 та 0,50, відповідно). У групі 3 циклічність коливань річного стоку відповідає циклічності весняного водопілля, яке , вочевидь, і визначає формування річного стоку в цілому (коефіцієнти кореляції дорівнюють 0,72 та 0,07, відповідно). Водозбори групи 3 знаходиться у межах району 2 і утворюють підрайон.

Під час розгляду групи 4 (Щерек, Верещиця, Стрв'яж) установлено, що коливання різницевих інтегральних кривих (річний, максимальний весняний та максимальний дощовий) відбувається майже синхронно (рис. 7) з коефіцієнтами кореляції 0,72 та 0,81 для ординат максимальних витрат водопілля та максимальних дощових витрат, відповідно. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що у Карпатському районі основний вплив на формування характеру коливань річного стоку чинять умови формування дощового стоку, а у районі лівобережних приток верхньої течії Дністра (група 4) існує суттєвий вплив як дощового стоку, так і стоку весняного водопілля.

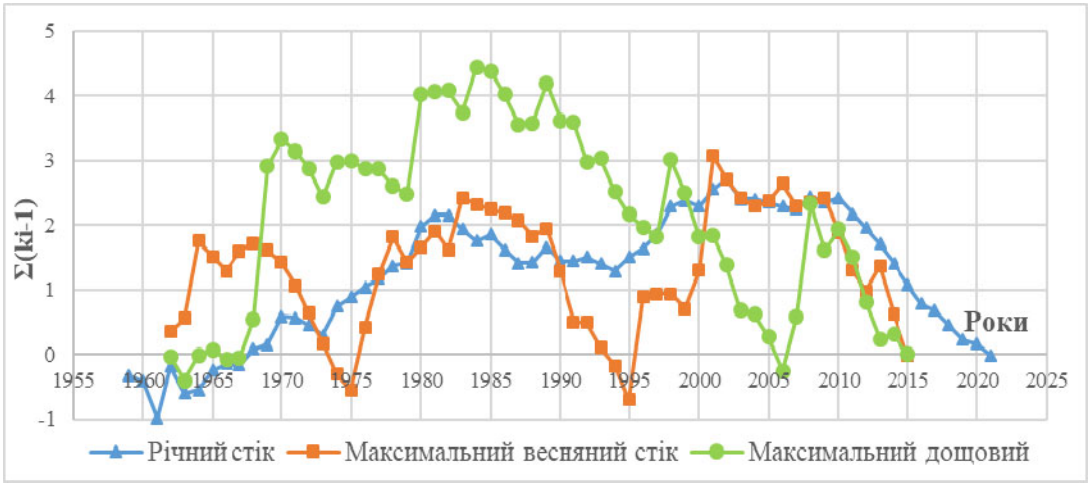


Рис. 6 – Суміщені осереднені різницеві інтегральні криві річного, максимального дощового та максимального весняного (талого) стоку річок Зовнішньокарпатського району (група 2)
Fig. 6 – Combined averaged residual mass curves of annual, maximal rain and maximal spring (melt) runoff of rivers in the Outer Carpathian region (group 2)

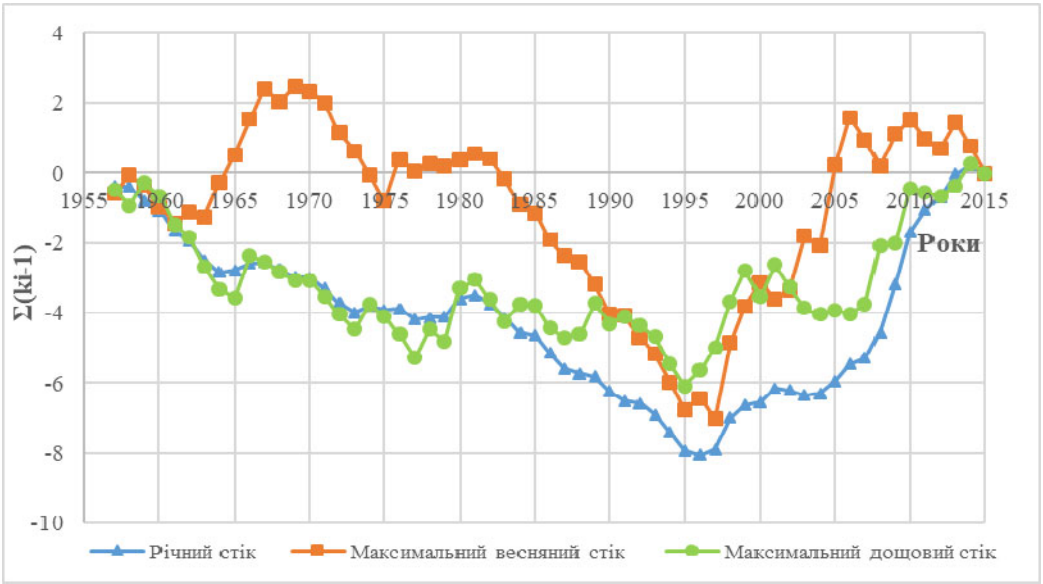


Рис. 7 – Суміщені осереднені різницеві інтегральні криві річного, максимального дощового та максимального весняного (талого) стоку лівобережних приток верхньої течії Дністра (група 4)
Fig. 7 – Combined averaged residual mass curves of annual, maximal rain and maximal spring (melt) runoff of the left bank tributaries of the upper Dniester (group 4)

Аналогічним чином виконувалися дослідження коливань річного, максимального весняного та максимального дощового стоку інших районів, виділених на основі аналізу виду осереднених інтегральних кривих.

Що стосується річок Поділля, то для них суттєвий вплив максимальних витрат водопілля або дощових паводків не виявлений. Зважаючи на існування значного регулювання стоку цих річок карстовими утвореннями та штучними водоймами, до розгляду були прийняті не максимальні витрати, а шари стоку за період весняного водопілля та дощових паводків (див. табл.1). Результати досліджень показали, що для Верхнього Подільського району (група 5) значущими є обидва джерела живлення – снігове та дощове, для Середнього Подільського району переважає вплив дощових паводків (коефіцієнт кореляції між ординатами різницевих інтегральних кривих річного та максимального стоку дощових паводків у вигляді шарів дорівнює 0,92). Для Нижнього Подільського району характер різницевих інтегральних кривих річного стоку наближається до коливань стоку рівнинних річок півдня України (рис. 8), на яких перехід у маловодну фазу відбувся у 80-ті роки минулого сторіччя. На жаль, через відсутність даних з початку 21 століття по створах гідрологічних спостережень, які знаходяться на території Молдови (трансграничні річки (лівобережні притоки Дністра) Кам'янка, Молокіш, Белочі, Ягорлик), повний аналіз коливань стоку річок Нижнього Подільського району неможливий. Згідно із обмеженими даними коефіцієнт кореляції між ординатами різницевих інтегральних кривих річного стоку і максимального стоку весняних водопіль досягає значення 0,95, що свідчить про значний вплив весняного водопілля на коливання річного стоку.

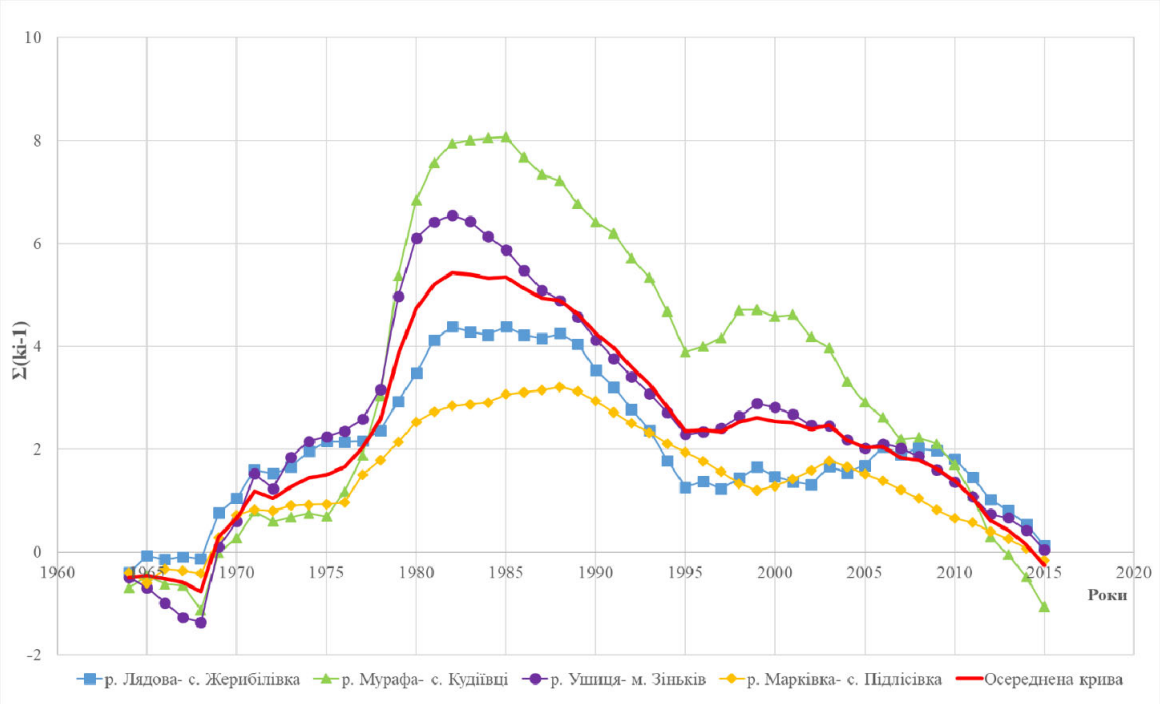


Рис. 8 – Різницеві інтегральні криві річного стоку для лівобережних приток середньої течії Дністра від Ушиці до Ягорлика (Нижній Подільський район, група 7)
Fig. 8 – Residual mass curves of annual runoff for the left-bank tributaries of the middle reaches of the Dniester from Ushytsia to Yahorlyk (Lower Podil district, group 7)

Таблиця 1 – Оцінка тісноти кореляційного зв'язку між ординатами осереднених по групах різницевих інтегральних кривих річного, максимального весняного та дощового стоку
Table 1 – Estimation of the closeness of the correlation between the ordinates of the residual mass curves of annual, maximal spring and rain runoff averaged over the groups

Райони коливань річного стоку, виділені за різницевими інтегральними кривими	Коефіцієнти кореляції між ординатами осереднених різницевих інтегральних кривих річного стоку із витратами та шарами максимального стоку весняного водопілля і дощових паводків			
	для витрат		для шарів стоку	
	Весняне водопілля	Дощовий паводок	Весняне водопілля	Дощовий паводок
Правобережні притоки ***Карпатський*** Група 1	0,28	0,70	–	–
Правобережні притоки ***Зовнішньокарпатський*** Група 2	0,46	0,50	–	–
Правобережні притоки Група 3	0,72	0,07	–	–
Лівобережні притоки Стрв'яж, Верещиця, Щерек ***Верхня течія Дністра*** Група 4	0,72	0,83	–	–
Лівобережні притоки від Гнилої Липи до Серет включно (змішана лісова зона) ***Верхній Подільський*** Група 5	0,24	0,28	0,58	0,53
Лівобережні притоки від Нічлави до Смотрича (лісостепова зона) ***Середній Подільський*** Група 6	0,30	0,17	0,60	0,92
Лівобережні притоки від Ушиці до Ягорлика ***Нижній Подільський*** Група 7	(0,92)	–	–	–

4 ВИСНОВКИ

1. За видом різницевих інтегральних кривих річного стоку річки Дністер та її приток у межах України виділено 7 груп водозборів із синхронними та синфазними коливаннями стоку. Установлено, що виділені райони відповідають районам, виділеним різними авторами у попередні роки з використанням різних методів та підходів, включаючи факторний та кластерний аналіз, метод головних компонент та інші.

2. Запропоновано для узагальнення характеру коливань стоку у різних групах використовувати осереднену по роках у межах кожної групи різницеву інтегральну криву. Результати дослідження дозволили виявити, що циклічність коливань головної річки Дністер визначається, головним чином, коливаннями стоку Карпатських приток, для яких кількість циклів та границі фаз водності співпадають.

У верхніх течіях річок Карпат характер коливань відрізняється від коливань головної річки, у зв'язку із чим було виділений Зовнішньо-Карпатський район.

3. Сумісний аналіз осереднених по групах різницевих інтегральних кривих, побудованих для середніх за рік витрат, а також для максимальних витрат весняного водопілля та дощових паводків дозволив установити, що головною рисою коливань стоку карпатських приток є тісний зв'язок (r=0,70) між ординатами кривих для річного та дощового стоку. Отриманий результат указує на значну роль дощового живлення та його динаміки на формування коливань річного стоку річок Карпат та Дністра як головної річки.

4. Виявлено, що для Зовнішньо-Карпатського району (група 2) характерний тісний зв'язок ординат різницевих інтегральних кривих річного стоку як із коливаннями максимального стоку як

паводків, так і водопілля. Для окремих річок району 2, де основним є вплив весняного водопілля, тісний лінійний зв'язок ординат різницевих інтегральних кривих річного стоку установлений лише із кривими, побудованими для весняного водопілля (r=0,72). Такі річки утворюють групу 3 у межах Зовнішньо-Карпатського району.

5. Показано, що на лівобережних рівнинних притоках Дністра, які відносяться до Верхнього Подільського (група 5) та Середнього Подільского (група 6) районів, тіснота лінійних зв'язків між ординатами різницевих інтегральних кривих стає більш вираженою, коли для їх побудови використовуються не витрати, а шари стоку за весняне водопілля або дощовий паводок. Використання у розрахунках шарів стоку дозволяє урахувати вплив регулюючої ролі карстових утворень та штучних водойм.

6. Вид різницевих інтегральних кривих коливань річного стоку, який докорінно відрізняється від коливань головної річки Дністер, відноситься до верхніх лівобережних приток Дністра (Стрв'яж, Верещиця, Щерець) та нижніх лівобережних приток від Ушиці до Ягорлика (Нижній Подільський район) включно. Така зміна характеру коливань пояснюється, скоріш за все, переважаючою дією інших впливових атмосферних процесів, які визначають кліматичні умови формування стоку цих приток.

7. Таким чином, різниця у характері коливань річного стоку у створах однієї і тієї ж річки або поряд розташованих річок може бути поясненою різною роллю весняного водопілля у формуванні річного стоку річок. Оскільки внесок весняного водопілля у загальне живлення річок змінюється через потепління, то цей факт може бути використаний для пояснення динаміки у часі границь виділених за синхронністю та синфазністю коливань районів.

Слід зазначити, що розглянута тематика має бути продовженою по мірі зростання тривалості спостережень за змінами кліматичних чинників та характеристик стоку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату: колективна монографія / за ред. С. М. Степаненка, А. М. Польового; Одеський державний екологічний університет. Одеса: ТЕС, 2018. 548 с. ISBN 9786177711222.
2. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities. 22.12.2000. L. 327. Vol. 43: 72 p.
3. Changing climate both increases and decreases European river floods / Blöschl G., Hall J., Viglione A. et al. *Nature*. 2019. № 573. Pp. 108-111.
4. Стратегическая программа действий для бассейна реки Днестр. Кишинев – Киев, 2020. 65 с.
5. Гідрохімічний режим та якість поверхневих вод басейну Дністра на території України / В. К. Хільчевський, О. М. Гончар, М. Р. Забокрицька та ін; за ред. В. К. Хільчевського, В. А. Сташука. Київ : Ніка-центр, 2013. 256 с.
6. Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз): монографія. Київ : Ніка-центр, 2010. 316 с.
7. Швебс Г. І., Ігошин М. І. Каталог річок і водойм України: навчально-довідковий посіб. Одеса: Астропринт, 2003. 389 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 1. Западная Украина и Молдавия / под ред. Б. М. Штейнгольца. Ленинград, 1964. 245 с.
9. Пилипович О., Ковальчук І. Геологія басейново-річкової системи верхнього Дністра: монографія. Львів-Київ : ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 284 с. URL: https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/10/% (дата звернення: 12.11.2023).
10. Климчук А. Б. Карст и природные полости. Экологическая геология Украины / под ред. Шестопалова В. М. Киев : Наукова думка, 2009. 409 с. URL: http://.institute.speleoukraine.net/karst-and-caves/ukrainian-karst (дата обращения 15.11.2023).
11. Горбачова Л. О. Багаторічні тенденції річного стоку води річок України та його кліматичних чинників / *Гідрологія. Водні ресурси. Наукові праці УкрДГМІ*. 2016. Вип. 269. С. 94-106.
12. Лобода Н. С. Расчеты и обобщения характеристик годового стока рек Украины в условиях антропогенного влияния: монография. Одесса: Экология, 2005. 208 с.
13. Мельник С. В., Лобода Н. С. Районирование бассейна Верхнего Днестра по характеру колебаний годового стока на основе кластерного анализа / *Український гідрометеорологічний журнал*. Одеса : ТЕС. 2010. №6. С. 180-189.
14. Мельник С. В., Лобода Н. С. Оцінка змін характеристик стоку лівобережних приток Верхнього Дністра в умовах потепління. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2021. №27. С. 55-65. https://doi.org/10.31481/uhmj.27.2021.06
15. Melnic V. S., Loboda N. S. 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. https://doi.org/10.26491/mhwm/126705
16. Горбачова Л. О., Барандіч С. І. Просторово-часова мінливість максимального стоку весняного водопілля та паводків змішаного походження річок України/ Гідрологія. Водні ресурси. *Наукові праці УкрДГМІ*, 2016. Вип. 269. С. 107-114.
17. Овчарук В. А., Гопченко Є. Д., Траскова А. В. Нормування характеристик максимального стоку весняного водпілля в басейні річки Дністер: моногр. Харків: ФОП Панов А. М., 2017. 252 с.
18. Лобода Н. С., Козлов М. О., Катинська І. В. Оцінка змін водних ресурсів Гірського Дністра у XXI сторіччі за сценарієм RCP8.5 на основі моделі «клімат-стік». *Український гідрометеорологічний журнал*. 2021.

28. С. 48-64. https://doi.org/10.31481/uhmj.28.2021.05
19. Вишневський В. І., Куций А. В. Багаторічні зміни водного режиму річок України. Київ : Наукова думка, 2022. 252 с.
20. Climate change impact on regional floods in the Carpathian region / Didovets I., Krysanova V., Bürgera G., Snizhkoc S., Balabukhd V., Bronsterta A. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2019. № 22. Pp. 1-14.
21. 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.
22. Гопченко Є. Д., Лобода Н. С., Овчарук В. А. Гідрологічні розрахунки: підручник. Одеса : ТЕС, 2014. 484 с.
23. Мельник С. В, Лобода Н. С. Динамика наносов верхнего и среднего Днестра в условиях антропогенной нагрузки и изменения климата: монография / Одесский государственный экологический университет. Одесса: ТЕС, 2019. 296 с.
24. Лобода Н, Мельник С. Оценка основных тенденций изменения максимального и годового стока рек бассейна Днестра. *Proceedings of the International Conference «Transboundary Dniester River Basin Management and EU Integration – Step by Step».* Chişinău: Eco-TIRAS, 2022. Pp. 163-167. URL: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/10847 (дата обращения: 23.10.2023)

REFERENCES

1. Stepanenko, S.M. & Polovyi, A.M. (2018). *Klimatychni ryzyky funktsionuvannia haluzei ekonomiky Ukrainy v umovakh zminy klimatu [Climate risks for the functioning of Ukrainian economic sectors in the context of climate change]*. Odesa: TES Publ. ISBN: 9786177711222. (in Ukr.)
2. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.* Official Journal of the European Communities. 22.12.2000. L. 327. Vol. 43.
3. Blqschl, G., Hall, J. & Viglione, A. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573, pp. 108-111.
4. Organization for Security and Co-operation in Europe (2020). *Strategicheskaya programma deystviy dlya basseyna reki Dnestr [Strategic Action Program for the Dniester River Basin]*. Kyshynev – Kyev. (in Russ.)
5. Khilchevskyi, V.K., Honchar, O.M., Zabokrytska, M.R. & Stashuk, V.A. (eds). (2013). *Hidrokhimichnyi rezhym ta yakist poverkhnevykh vod baseinu Dnistra na terytorii Ukrainy [Hydrochemical regime and quality of surface waters of the Dniester basin in Ukraine]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
6. Hrebin, V.V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrainy (landshaftno-hidrolohichnyi analiz) [Modern water regime of Ukrainian rivers (landscape and hydrological analysis)]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
7. Shvebs, H.I., Ihoshyn, M.I. (2003). *Kataloh richok i vodoim Ukrainy [Catalog of rivers and reservoirs of Ukraine]*. Odesa: Astroprynt. (in Ukr.)
8. Shteinholts, B.M. (eds). (1964). *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. Ukraina i Moldaviya. Zapadnaya Ukraina i Moldaviya [Surface water resources of the USSR: Hydrological study. Ukraine and Moldavia. Western Ukraine and Moldavia]*. Leningrad. (in Russ.)
9. Pylypovych, O. & Kovalchuk, I. (2017). *Heolohiia baseinovo-richkovoi systemy verkhnoho Dnistra [Geology of the Upper Dniester Basin and River System]*. LNU imeni Ivana Franka, Lviv-Kyiv. Available at: https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/10/% (Accessed: 12.11.23) (in Ukr.)
10. Klimchuk, A.B, Shestopalova, V.M. (eds). (2009). *Karst i prirodnye polosti. Ekologicheskaya geologiya Ukrainy [Karst and natural cavities. Environmental Geology of Ukraine]*. Kiev: Naukova dumka. Available at: http://www.institute.speleoukraine.net/karst-and-caves/ukrainian-karst (Accessed: 15.11.2023). (in Russ.)
11. Horbachova, L.O. (2016). Bahatorichni tendentsii richnoho stoku vody richok Ukrainy ta yoho klimatychnykh chynnykiv. Vodni resursy [Long-term trends in the annual water flow of Ukrainian rivers and its climatic factors. Water resources]. *Naukovi pratsi UkrDHMI [Scientifical works of USHMI]*, 269, pp. 94-106. (in Ukr.)
12. Loboda, N.S. (2005). *Raschety i obobshcheniya kharakteristik godovogo stoka rek Ukrainy v usloviyakh antropogennogo vliyaniya [Calculations and generalizations of annual runoff characteristics of Ukrainian rivers under conditions of anthropogenic influence]*. Odessa: Ekologiya. (in Russ.)
13. Mel'nik, S.V. & Loboda, N.S. (2010). Rayonirovanie basseyna Verkhnego Dnestra po kharakteru kolebaniy godovogo stoka na osnove klasternogo analiza. [Regionalization of the Upper Dniester basin by character of annual flow fluctuations based on cluster analysis]. *Ukraïns'kij gìdrometeorologìčnij žurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 6, pp. 180-189. (in Russ.)
14. Melnyk, S.V. & Loboda, N.S. (2021). Otsinka zmin kharakterystyk stoku livoberezhnykh prytok Verkhnoho Dnistra v umovakh poteplinnia [Assessment of changes in the characteristics of the flow of the left-bank tributaries of the Upper Dniester in the conditions of warming]. *Ukraïns'kij gìdrometeorologìčnij žurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 27, pp. 55-65. https://doi.org/10.31481/uhmj.27.2021.06 (in Ukr.)
15. Melnic, V.S. & Loboda, N.S. (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. https://doi.org/10.26491/mhwm/126705
16. Horbachova, L.O. & Barandich, S.I. (2016). Prostorovo-chasova minlyvist maksymalnoho stoku vesnianoho vodopillia ta pavodkiv zmishanoho pokhodzhennia richok Ukrainy [Spatial and temporal variability of the maximum runoff of spring floods and floods of mixed origin in the rivers of Ukraine]. *Naukovi pratsi UkrDHMI [Scientifical works of USHMI]*, 269, pp. 107-114. (in Ukr.)
17. Ovcharuk, V.A., Hopchenko, Y.D. & Traskova, A.V. (2017). *Normuvannia kharakterystyk maksymalnoho stoku vesnianoho vodpillia v baseini richky Dnister [Normalization of the characteristics of the maximum spring flood runoff in the Dniester River basin]*. Kharkiv: FOP Panov A. M. Publ. (in Ukr.)
18. Loboda, N.S., Kozlov, M.O. & Katynska, I.V. (2021). Otsinka zmin vodnykh resursiv Hirskoho Dnistra u XXI storichchi za stsenariiem RCP8.5 na osnovi modeli «klimat-stik» [Assessment of changes in the water resources of the Mountain Dniester in the XXI century under the RCP8.5 scenario based on the climate-runoff model]. *Ukraïns'kij gìdrometeorologìčnij žurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 28, pp. 48-64. https://doi.org/10.31481/uhmj.28.2021.05 (in Ukr.)

19. Vyshnevskyi, V.I. & Kutsyi, A.V. (2022). *Bahatorichni zminy vodnoho rezhymu richok Ukrainy. [Long-term changes in the water regime of Ukrainian rivers]*. Kyiv: Naukova dumka. (in Ukr.)
20. Didovets, I., Krysanova, V., Вьrgera, G., Snizhkoc, S., Balabukhd, V. & Bronsterta, A. (2019). Climate change impact on regional floods in the Carpathian region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22, pp. 1-14.
21. Mel'nik, S.V. & Loboda, N.S. (2019). *Dinamika nanosov verhnego i srednego Dnestra v uslovijah antropogennoj nagruzki i izmenenija klimata [Sediment dynamics of the upper and middle Dniester under anthropogenic load and climate change conditions]*. Odessa: TES Publ. (in Russ.)
22. Hopchenko, Y D., Loboda, N.S. & Ovcharuk, V.A. (2014). *Hidrolohichni rozrakhunky [Hydrological calculations]*. Odesa: TES Publ. (in Ukr.)
23. Mel'nik, S.V. & Loboda, N.S. (2019). *Dinamika nanosov verhnego i srednego Dnestra v uslovijah antropogennoj nagruzki i izmenenija klimata [Sediment dynamics of the upper and middle Dniester under anthropogenic load and climate change conditions]*. Odessa State Environmental University. Odessa: TES Publ. (in Russ.)
24. Loboda, N. & Mel'nik, S. (2022). [Assessment of the main trends in the maximum and annual runoff of rivers in the Dniester basin]. In: *Proceedings of the International Conference «Transboundary Dniester River Basin Management and EU Integration – Step by Step»*, 27-28 October. Chisinau, Moldova. Chisinau: Eco-TIRAS, pp. 163-167. Available at: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/10847 (Accessed: 23.10.2023) (in Russ.)

PATTERNS OF RUNOFF FLUCTUATIONS OF THE DNIESTER RIVER (UKRAINE) UNDER CONDITIONS OF CLIMATE CHANGE AT THE BEGINNING OF THE 21st CENTURY

N. S. Loboda, M. R. Rozvod

Odesa State Environmental University,
15 Lvivska St., 65016, Odesa, Ukraine,
natalie.loboda@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0794-9951

The relevance of the chosen topic is associated with the impact of climate change on fluctuations of water content in Ukrainian rivers. The consequences of warming depend on physical and geographical conditions and vary significantly across different natural zones. The behaviour of catchment areas affected by climate change varies depending on landscape (mountainous or flat terrain) and latitude. This results in instability of boundaries of catchment areas with annual runoff synchronous and out-of-phase fluctuations. The study aims at establishing the patterns of annual runoff fluctuations in the Dniester basin with relation to fluctuations in the maximum runoff of rainfalls and spring floods. The spring floods are the ones that determine a significant part of annual runoff and depend on the impact of warming during the winter season. The study's main method is the method of constructing difference integral curves of annual and maximum rainfalls and maximum spring runoff and their analysis. There are 7 groups (zones) within the Dniester River catchment area identified by the type of difference integral curves of annual runoff. Fluctuations in annual, maximum rain and spring runoff were compared using the curves averaged within each group. The degree of synchronicity of fluctuations was estimated via correlation coefficients between the ordinates of difference integral curves. It was found that the main river oscillations retain their cyclicity along its entire length, even below the Dniester HPP. The last transition to a low-water phase occurred in 2010-2011. It was discovered that the main river's cyclical nature mostly results from fluctuations in the runoff of mountainous Carpathian tributaries that form the Dniester's runoff formation zone. This part of the catchment area is characterized by a high amount of snow and rainfalls feeding the river with the role of rainfalls having a predominant character. In the upper reaches of Carpathian rivers, where the impact of warming is not yet sufficiently pronounced at high altitudes, spring floods play a significant role in runoff formation. In the upper reaches of Carpathian rivers there is an additional zone where fluctuations in annual runoff are caused by both rainfalls and spring floods. The boundaries of this zone (2nd district) may change as the effects of warming increase high in the mountains. On the left-bank tributaries, the runoff fluctuations in Verkhnepodilskyi and Serednepodilskyi districts are similar to those of the main river, however, there is a shift in the dates of the last transition to a low-water phase. The study indicates the likelihood of karst and artificial reservoirs influence. It also indicates a significant difference in the nature of runoff fluctuations of the upper left-bank tributaries (Strvyazh, Vereshchytsia, Shcherek) and lower left-bank tributaries. They are affected by other atmospheric processes and climatic factors associated with such processes.

Keywords: cyclicity of runoff fluctuations; annual runoff; spring floods; rain floods; zonation.

Подання до редакції **: 29. 11. 2023**
Надходження остаточної версії **: 05. 12. 2023**
Публікація статті : **21. 12. 2023**

Ukrainian hydrometeorological journal, 2023, 32, 63-79 doi: 10.31481/uhmj.32.2023.05
ISSN 2311-0902 (print), 2616-7271 (online)

УДК 551.465+551.468.6

СЕРЕДНІЙ СТАН ТА СЕЗОННА МІНЛИВІСТЬ СТРУКТУРИ І ДИНАМІКИ ПЕРЕХІДНИХ ВОД ДНІПРОВСЬКО-БУЗЬКОЇ ГИРЛОВОЇ ОБЛАСТІ

Ю. П. Ільїн

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,
пр. Науки, 37, 03038, Київ, Україна, ypilyin@gmail.com

На основі даних багатолітніх берегових та експедиційних спостережень розглянуто структуру і динаміку перехідних вод в системі Дніпровсько-Бузького лиману (ДБЛ) до руйнування Каховської ГЕС як основу для майбутнього опису змін гідрологічного режиму. Побудовано середні річні й сезонні карти та вертикальні розрізи температури і солоності. Проаналізовано головні чинники формування та поширення перехідних вод – річковий стік, контраст солоності (густини) та приземний вітер. Розраховано і проаналізовано низку розмірних й безрозмірних критеріїв та показників динаміки перехідних вод в межах та за межами ДБЛ.

Аналіз попередніх досліджень трансформації річкових вод у Північно-Західній частині Чорного моря (ПЗЧМ) та динаміки плавучих шлейфів в інших районах прибережної смуги Світового океану дозволяє встановити зовнішньою межею перехідних вод ПЗЧМ ізохалину 14 ‰.

За даними моніторингу 1992 – 2020 років найвищій ступінь розпріснення ДБЛ і виносу перехідної води з Кінбурнської протоки відзначався навесні, в умовах зростання об’єму річкового стоку і переважання вітру зі сходу. При цьому збільшення повторюваності південного вітру сприяло притисканню плюму до узбережжя за межами лиману. Влітку посилювався вплив морських вод на ДБЛ через зменшення річкового стоку та збільшення повторюваності західного вітру. Відповідно до теоретичних критеріїв, за маловітряних умов естуарій продукує поверхнево-адвективний шлейф, який зазнає впливу плавучості та сили Коріоліса, без ефекту тертя у придонному граничному шарі. Відстань, на яку поширюється такий плюм, навіть влітку не перевищує половини шляху від Кінбурнської протоки до Одеської затоки. Потраплянню туди перехідних вод ДБЛ навесні та восени можуть сприяти супутні вітрові течії. Головним чинником літньої динаміки шлейфу стає західний вітер і генеровані ним течії, які перешкоджають поширенню перехідних вод на захід уздовж берега, відтискаючи їх у бік лиману та на південь від нього. Це не заперечує можливості іншої поведінки плюму, обумовленої збільшенням об’єму річкового стоку та синоптичною мінливістю поля вітру в конкретні роки і місяці.

Ключові слова: солоність і температура води; перехідні води; шлейф; плюм; плавучість; річковий стік; вітер; морські течії.

1 ВСТУП

Після руйнування військами РФ греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року може суттєво змінитися гідрологічний режим гирлової ділянки р. Дніпро, Дніпровсько-Бузького лиману і прилеглих районів Чорного моря. Одна зі складових цього режиму – формування та поширення перехідних (транзитних) вод, які є об’єктом державного моніторингу відповідно до постанови Кабінету Міністрів України № 758 від 19 вересня 2018 р. Для відновлення післявоєнної системи гирлових і морських гідрометеорологічних і гідрохімічних спостережень, а також аналізу результатів моніторингу необхідно виконати узагальнення попередніх даних і встановити середні показники режиму перехідних вод, які у подальшому будуть базою для порівняння і опису майбутніх змін.

Відповідно до Водного кодексу України, перехідні води – це поверхневі води у межах гирлової ділянки річки, а також лиманів, де відбувається змішування прісних та солоних вод. Таке визначення не відповідає численним результатам вітчизняних і закордонних досліджень, які доводять, що змішування і

трансформація річкових вод відбувається також далеко за межами річкових гирл та естуаріїв (або лиманів), тобто гирлових областей річок.

Особливу роль річковий стік грає у формуванні структури і динаміки вод Чорного моря, зокрема його Північно-Західної частини (ПЗЧМ), де знаходяться гирлові області найбільших рік – Дунаю, Дніпра з Південним Бугом та Дністра. Разом ці джерела постачають у середньому 76 % прісних вод [1], які далі трансформуються у кілька етапів, доки не перетворяться у поверхневу водну масу Чорного моря [2, 3].

Внаслідок взаємодії річкових і морських вод, в лиманах формуються перехідні води, а за межами лиманів утворюються «плюми» або «шлейфи» (обидва терміни є синонімами і використовуватимуться надалі) розпріснених вод, що поширюються уздовж прилеглих ділянок морського узбережжя та, за деяких умов, у бік відкритого моря, утворюючи з морськими прибережними водами локальні гідрологічні фронти.

Порівняно з морськими водами, річкові та перехідні води завжди мають меншу прозорість, більш зелений або жовтий колір через більший вміст завислих і розчинених домішок, включно з біогенними та забруднювальними речовинами. Поширення (адвекція) перехідних вод значно погіршує привабливість відпочинку на прилеглих морських узбережжях. Цей процес також впливає на морське риболовство та аквакультуру. Тому гирлові області річок ПЗЧМ є традиційними об’єктами екологічного моніторингу морського довкілля.

Метою даної роботи є дослідження середньої багаторічної структури і динаміки перехідних вод (включно з їх сезонною мінливістю) в системі Дніпровсько-Бузької гирлової області (ДБГО), яка складається з гирлових ділянок річок Дніпра і Південного Бугу, Дніпровсько-Бузького лиману (ДБЛ) та прилеглих районів ПЗЧМ.

Відповідно до цього побудовано подальший матеріал статті. На початку наведено стислі характеристики вивченості проблеми та географічних умов району дослідження. Далі дано опис методики дослідження та перелік використаних даних спостережень. Побудовано середні річні й сезонні карти та вертикальні розрізи температури і солоності ДБГО. Проаналізовано головні чинники формування та поширення перехідних вод – річковий стік, контраст солоності (густини) та приземний вітер. Розраховано і проаналізовано низку розмірних й безрозмірних критеріїв та показників динаміки перехідних вод в межах та за межами ДБЛ.

2 ВИВЧЕНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

2.1 Огляд публікацій

Питання поширення і трансформації річкових вод у Чорному морі ґрунтовно досліджувалися в монографії [2]. Ця робота базувалася на даних спостережень, накопичених до кінця 1960-х років. Після того отримано набагато більше гідрологічної інформації, а дослідження з даної проблеми не втратили актуальності [3 – 7], перш за все – у зв’язку з кліматичними змінами останніх десятиріч і проблемами екологічного моніторингу річкових і морських вод.

В роботі [3] на основі статистичного аналізу даних про солоність S поверхневих вод ПЗЧМ запропонована класифікація розпріснених (трансформованих) вод та фронтів, які утворюються між ними: 1) Зона первинної трансформації, включно з фронтом первинної трансформації (гідрофронтом), S = 3 – 10 ‰. До цієї зони можна додати прісні (~ 0 ‰) води гирлових водотоків річки, де власне починається процес змішування (трансформації). 2) Зона вторинної трансформації між ізохалинами 10 і 14 ‰, що обмежується фронтом вторинної трансформації. 3) Зона повної трансформації, зовнішньою межею якої є фронт повної трансформації (ізохалина S = 17 ‰). Води з солоністю на поверхні моря S > 17 ‰ вважаються морськими поверхневими водами ПЗЧМ.

Встановлено, що живлення річковим стоком безпосередньо впливає на води перших двох зон, а далі трансформація і поширення розпрісненої води відбувається переважно за рахунок адвекції та турбулентної дифузії у відкритому морі. *Надалі будемо вважати перехідними водами ті, що відносяться до зон початкової та вторинної трансформації річкових вод.*

Феноменологія перехідних вод ***складається з двох етапів***:

- перетворення річкової води, що надходить з русла або дельтових водотоків річки, в межах відкритого естуарію (затоки, лиману);
- утворення та поширення шлейфу розпріснених вод як цілісного елементу структури прибережного району моря (поза межами естуарію).

Доступна початкова інформація щодо визначення та типізації естуаріїв, а також

процесів водообміну та перемішування внаслідок взаємодії з океаном викладена в навчальному курсі [8]. Зокрема, там наведені морфологічні типи естуаріїв та їхня класифікація за переважаючими динамічними процесами. Остання запозичена з роботи [9]. Розглянуто також класичні моделі водообміну через протоки у застосуванні до естуарію [10]. Найбільш змістовні огляди стану вивчення фізичних процесів в естуаріях представлені в роботах [11, 12]. Експериментальному та теоретичному вивченню взаємодії естуарію з прилеглим шельфом присвячені, наприклад, роботи [13 – 15].

Загалом можна відзначити, що формування і підтримання структури перехідних вод в естуарії визначається балансом і взаємодією двох головних механізмів: 1) утворенням вертикальної стратифікації (плавучості) шляхом постачання у резервуар, заповнений морською водою, більш легких прісних вод річкового стоку; 2) руйнування стратифікації процесами горизонтального і вертикального перемішування. Відносний внесок цих механізмів обраховується за допомогою естуарного числа Річардсона [16].

Якщо не вдаватися в деталі взаємодії процесів підтримки стратифікації (плавучості) та турбулентного перемішування, а також циркуляції вод в межах естуарію, то можна використовувати інтегральні, або бокс-моделі, які призначені для оцінки результуючих параметрів водообміну з прилеглим морем [17 – 19]. Бокс-модель естуарію (БМЕ) дозволяє також коректно інтерпретувати дані спостережень і формувати реалістичні граничні умови для велико- та мезомасштабних чисельних моделей океанів і морів [18, 20, 21].

Аналіз літературних джерел і наявних даних дозволяє зробити висновок, що, наприклад, для Дністровського лиману можна застосувати нестратифіковану БМЕ, а для Дніпровського і Бузького лиманів доцільно врахувати стратифікацію в рамках двох-шарової БМЕ, якщо розглядати у якості нижнього шару воду у вузькому судноплавному каналі.

Низка досліджень присвячена фізичним механізмам та просторовій структурі шлейфів (плюмів) трансформованих річкових (перехідних) вод, що виходять безпосередньо в море з гирлових водотоків річок (як у випадку дельти Дунаю) або з естуаріїв (таких, як Дніпровсько-Бузький та Дністровський лимани). Це, наприклад, роботи [22 – 29]. Шляхом застосування систем рівнянь руху, нерозривності і стану морської води та введення характерних масштабів змінних з'ясовані гідродинамічні розмірні та безрозмірні критерії, що визначають характер та подальшу поведінку плюмів після виходу їх з естуарію у відкрите море. Такими критеріями є числа Фруда, Кельвіна та Екмана, бароклинний радіус деформації Россбі та інші. Деякі з них будуть використані далі в цій роботі.

В структурі плюмів розглядаються чотири регіони, які суттєво відрізняються між собою домінуючим динамічним балансом [26]: 1) виток: область в естуарії або всередині гирла річки, де генерується початкова плавучість і імпульс річкового шлейфу; 2) ближнє поле: струменеподібна область початкового розширення шлейфу, де імпульс шару шлейфу домінує над його плавучістю, що призводить до інтенсивного перемішування; 3) Середнє поле: область, де обертання Землі починає домінувати, зупиняючи поширення шлейфу і повертаючи шлейф у напрямку вздовж узбережжя (праворуч у північній півкулі); 4) далеке поле: область за середнім полем, де шлейфова вода втратила будь-яку пам'ять про імпульс втікання, але все ще відрізняється від навколишньої води. Неважко помітити, що ці динамічні райони відповідають зонам первинної, вторинної та повної трансформації прісних вод ПЗЧМ [3], тобто райони витоку та ближнього поля відповідають зонам солоністю 0-10, середнього поля – 10-14, а далекого – 14-17 ‰. І якщо вважати, що перехідними є води, які відчувають вплив початкового імпульсу, заданого витратами річкової води, то отримаємо граничний критерій поширення перехідних вод ПЗЧМ – ізохалину 14 ‰. На сезонних картах розподілу солоності ПЗЧМ видно, що ця ізохалина виходить далеко за межі відкритих лиманів, особливо у весняно-літній сезон [5, 6].

Теорія Янковського-Чапмена [29] дає специфічні масштаби довжини та глибини, за допомогою яких можна визначити різновид та поведінку плюму на основі геометричних параметрів протоки, через яку виноситься перехідна вода у море, швидкості течії у протоці та середньої густини (солоності) вод плюму і прилеглого моря. Теорія пояснює структуру та поширення від берега плавучого витоку води (плюму) з ріки або естуарію на шельф в умовах слабкого вітру та відсутності фонової течії. Розглядаються два конкуруючі механізми, які рухають плюм від берега: 1) радіальне розширення більш легкої води поверх оточуючих вод, яка далі відхиляється силою Коріоліса і утворює антициклонічний

циклострофічний плюм, та 2) переніс від берега у придонному граничному шарі з тертям, який рухає весь плюм від берега, поки існує контакт зі дном.

Вплив вітру, який генерує турбулентне перемішування та вітрові течії на поверхні і в товщі морських вод, може сприяти поширенню плюму уздовж берега або притисканню до нього, а також сприяти переносу плюму від берега та повному руйнуванню його структури. Це залежить від напрямку вітру відносно берегової лінії та джерела витоку плюму, а також рельєфу дна у районі [26, 28].

2.2 Географічна характеристика району дослідження

Дніпровсько-Бузька гирлова область складається з гирла р. Південний Буг, Бузького лиману (БЛ), дельти р. Дніпро, Дніпровського лиману (ДЛ) та прилеглого району відкритого моря. ДЛ і БЛ поєднані між собою Сакенською протокою. До БЛ надходять води р. Південний Буг, а до ДЛ – р. Дніпро. ДЛ поєднується з Чорним морем через Кінбурнську протоку. Систематичні гідролого-гідрохімічні дослідження ДБГО виконуються експедиційними суднами та береговими станціями і постами Миколаївського центру з гідрометеорології ДСНС України. На рис. 1 показана карта ДБГО з розташованими в її межах морськими гідрометеорологічними станціями (МГ) Миколаїв, Очаків, Херсон та постами (МГП) Аджигіол, Парутине, Станіслав, Касперівка, Геройське.

Всебічну інформацію про гідрологічний режим Дніпровсько-Бузького лиману (ДБЛ) наведено в монографії [30]. Питання мінливості окремих показників гідрологічних та гідрохімічних умов системи лиманів та гирл річок, що до них втікають, а також водообміну з прилеглим морем розглянуті, зокрема, в працях [31 – 37]. Приклади чисельного моделювання процесів переносу води й речовин в системі ДБГО наведено в публікаціях [38 – 41].

Морфометричні параметри ДБЛ [30]: площа – 928 км^2, об'єм – 4,1 км^3, середня глибина – 4,4 м.

За оцінками [40], окремі параметри Дніпровського і Бузького лиманів: площа - 764,7 і 163,3 км^2; об'єм - 3,27 і 0,83 км^3; середня глибина - 4,3 і 5,0 м відповідно.

Довжина ДЛ від краю дельти р. Дніпро до середини Кінбурнської протоки 63 км, середня ширина 12,1 км, середня площа поперечного перетину 52030 м^2. Довжина БЛ від Варварівського мосту у м. Миколаїв до середини Сакенської протоки 45,4 км; середня ширина 3,6 км; середня площа перетину 18000 м^2.

Мінімальна ширина Кінбурнської протоки становить 3,7 км, а середня глибина – 4,4 м (максимум у вузькому суднохідному каналі – до 20 м). Сакенська протока має ширину 5,4 км на траверзі мису Сакен, а середню глибину – близько 5 м.

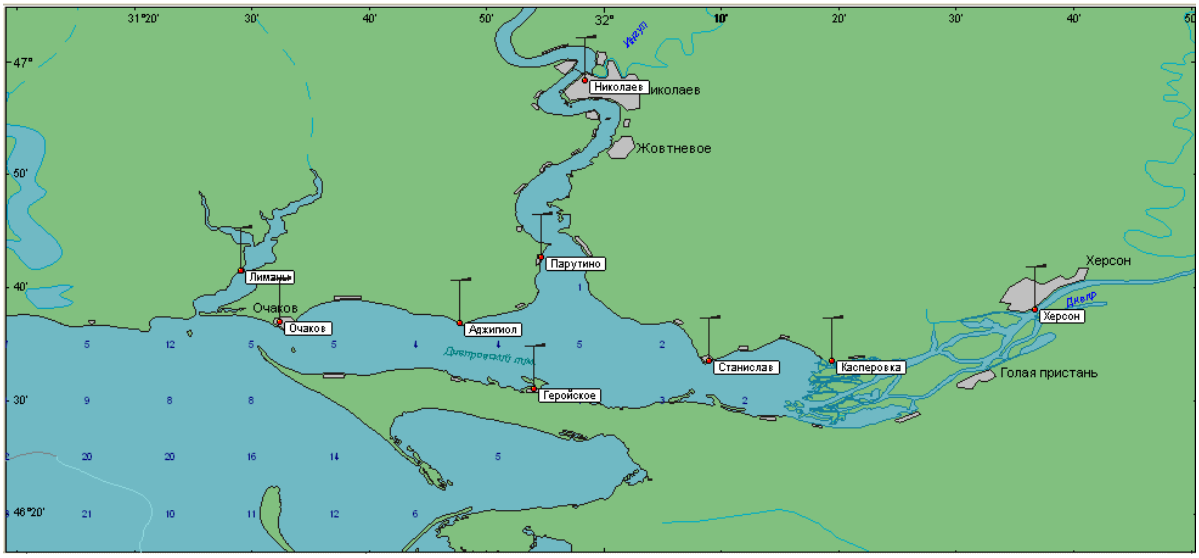


Рис. 1 – Дніпровсько-Бузька гирлова область та мережа гідрометеорологічних станцій і постів. Сині цифри – глибина (м)
Fig. 1 – Dnipro-Bug estuary region and a network of hydrometeorological stations and posts. Blue numbers – water depth (m)

Середня багаторічна величина стоку р. Дніпро за даними замикаючого створу Каховської ГЕС до її руйнування становить (± середньоквадратичне відхилення) 41,432 ± 8,78, а р. Південний Буг за даними замикаючого створу с. Олександрівка – 2,712 ± 0,69 км^3/рік. Середні показники солоності (шару від поверхні до дна) за даними моніторингу Гідрометслужби 1992-2020 років: Бузького лиману 6,35 ± 4,79 ‰; Дніпровського лиману 6,78 ± 5,76 ‰; прилеглої ділянки Чорного моря 12,61 ± 4,71 ‰ [40].

3 МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ТА ВИКОРИСТАНІ ДАНІ

Перший крок дослідження – побудова за даними гідрологічних спостережень та аналіз карт і розрізів розподілу перехідних вод. Експедиційні роботи у межах ДБГО виконувалися фахівцями Миколаївського ЦГМ на дослідницькому судні «Тайфун» протягом 1992-2020 років. Спостереження та відбір проб на гідрохімічний аналіз проводилися відповідно до щорічних планів експедиційних робіт на мережі визначених океанографічних станцій на заданих горизонтах за допомогою батометричних серій. Залежно від обсягу параметрів, що досліджувалися (категорій станцій у програмі державного моніторингу), дискретність спостережень була у межах від 1 декади до 3 місяців. Брак даних у зимовий сезон (з грудня по лютий) через суворі погодні та льодові умови не дозволяє побудувати гідрологічні карти та розрізи, але для весни (березень – травень), літа (червень – серпень) та осені (вересень – листопад), а також загалом для усього року (без зими) є достатньо інформації для статистично достовірних оцінок середньої багаторічної горизонтальної і вертикальної термохалинної структури вод.

Головним показником перехідної води є солоність, низькі значення якої генерують аномалію густини (плавучість) відносно прибережної морської води. Але у сезонних змінах густини важливу роль відіграє також температура води. Карти і розрізи обох гідрологічних величин побудовано за допомогою програмного комплексу ODV (Ocean Data View), який має у своєму складі програму об'єктивного аналізу полів DIVA (Data-Interpolating Variational Analysis) [42].

Подальший аналіз середніх багаторічних показників структури і динаміки перехідних вод (включно з їх сезонною мінливістю) проводився у послідовності, яка викладена у оглядовій статті [26]. Перш за все розраховувалися середні річні і місячні величини естуарного числа Річардсона [27]:

$$Ri_e = (g'_r\, Q_r)/(L_e u^3), \qquad (1)$$

де $g' = g(\rho_0 - \rho)/\rho_0$ – приведена гравітація; g – прискорення сили тяжіння, м/с^2; $(\rho_0 - \rho)/\rho_0$ – відносна аномалія густини води або плавучість (ρ – густина води, кг/м^3; ρ_0 – густина фонової морської води); g'_r – приведена гравітація для $\rho = \rho_r$ (ρ_r – густина прісної річкової води з солоністю $S=0$); Q_r – об'єм річкового стоку (витрата води), м^3/с; L_e – середня ширина естуарію, м; u – швидкість течії, м/с (в [27] це середня амплітуда припливних течій; у випадку безприпливного естуарію ДБЛ її можна замінити середнім за глибиною модулем швидкості вітрових течій). Естуарне число Річардсона показує співвідношення між процесом, що підтримує плавучість шляхом надходження річкової води, і турбулентним перемішуванням, яке руйнує стратифікацію. $Ri_e \sim 1$ означає, що ці процеси знаходяться у рівновазі.

Структуру і динаміку плюму на виході з естуарію визначає число Фруда F, яке у даному випадку є співвідношенням швидкості течії води у вихідній протоці та фазової швидкості внутрішніх хвиль, шо генеруються у шарі стрибка густини на нижній межі шлейфу:

$$F = u_s/(g'h_s)^{1/2}, \qquad (2)$$

де $u_s = Q_{out}/(L_s h_s)$ – швидкість течії на виході з естуарію (у протоці); Q_{out} – об'ємний потік води, що витікає з протоки; L_s, h_s – ширина й глибина протоки відповідно. Для зони витоку відповідне число Фруда F_r буде базуватися на параметрах ρ_r, g'_r та середній глибині естуарію h_e, а замість u_s можна скористатися оцінкою швидкості стокової течії $u_r = Q_r/h_e L_e$.

Експериментальним шляхом встановлено, що для оцінки Q_{out} у Кінбурнській протоці ДЛ можна скористатися простою моделлю Кнудсена [10]:

$$Q_{out} = Q_r(\rho_0 - \rho_r)/(\rho_0 - \rho). \qquad (3)$$

Формула (3) справедлива для рівняння балансу води в естуарії $Q_{out} - Q_{in} = Q_r$, де Q_{in} – об'ємний потік води, що втікає з моря до естуарію, якщо знехтувати потоками

атмосферних опадів, випаровування та підземних вод у порівнянні з річковим стоком. Для гирлових областей великих річок їхня величина зазвичай не перевищує помилку визначення витрат річкової води (~10%). Врахування цих потоків потребує додання їхніх величин у праву частину рівняння балансу та підстановки цієї суми замість Q_r в (3). Формула (3) дає відносне відхилення 6-7 % від оцінок, отриманих за допомогою емпіричних залежностей між потоками водообміну у Кінбурнській протоці [34], що є співставним з точністю самих емпіричних формул, апроксимованих за даними багаторічних прямих вимірювань течій.

Величини числа Фруда визначають режим потоку: $F = 1$ – критичний; $F < 1$ – докритичний; $F > 1$ – надкритичний. В [26] пропонується наступна послідовність характеристики плюму.

Якщо в естуарії $F_r < 1$, тоді перевіряється район витоку з естуарія (протока). Якщо гирло річки виходить безпосередньо у море і $F_r \geq 1$, то плюм радіально розширюється і швидко перемішується з оточуючими морськими водами завдяки зсувній нестійкості та впливу вітру й хвиль (режим ближнього поля). Якщо на виході з естуарію $F \geq 1$, плюм переходить у режим ближнього поля, потім в режим середнього поля, де відхиляється силою Коріоліса і спрямовується уздовж берега, переходячи в режим дальнього поля. Якщо ж $F < 1$, то плюм потрапляє під вплив механізмів середнього і дальнього поля, тобто обертання Землі, вітрового і зсувного перемішування та можливого захвату плюму дном. На цьому етапі можна скористатися висновками теорії Янковського-Чапмена [29].

Плюм залишається прикріпленим до дна моря до глибини (м), яка задається виразом:

$$H_b = (2Q_{out}f/g')^{1/2}, \qquad (4)$$

де $f = 2\omega\sin\varphi$ – параметр Коріоліса (ω – частота обертання Землі, c^{-1}; φ – географічна широта).

Поверхневий прояв циклострофічного плюму, або опуклість (“bulge”) поширюється від берега на відстань (м):

$$Y = 2Rd(3+F^2)/(2+F^2)^{1/2}, \qquad (5)$$

де $Rd = (g'h_s)^{1/2}/f$ – бароклинний радіус деформації Россбі (м).

Формула (4) використовується як критерій взаємодії плюму з дном після того, як за критерієм $F < 1$ з’ясовується, що плюмом керують механізми перемішування середнього та дальнього полів – обертання Землі, градієнти тиску (густини води), екманівський зсув, вітрові хвилі.

Обидва масштаби (4, 5) залежать лише від параметрів протоки, об’єму річкового стоку та контрасту густини (солоності) води плюму з морською водою на шельфі. Відповідно до теорії Янковського-Чапмена, за умов слабких або відсутніх вітрів та фонових течій існує три можливих сценарію:

1) Якщо розраховане H_b менше за глибину втікання h_s, то придонний граничний шар не переносить плавучість від берега і формується чисто поверхнево-адвективний плюм, який досягає відстані від берега не менш, ніж 4 радіуси деформації Россбі.

2) Якщо ізобата H_b знаходиться далі від берега, ніж Y, то домінує переніс у придонному граничному шарі і формується чисто придонно-адвективний плюм, який лишається захопленим уздовж ізобати H_b.

3) Якщо ізобата H_b глибше ніж глибина втікання h_s, але ближче до берега, ніж Y, то формується проміжний плюм, який відділяється від дна при глибині H_b та поширюється від берега на поверхні до відстані Y.

В роботі Уітні та Гервайна [28] запропоновано оцінювати вплив вітру на плавучі річкові шлейфи за допомогою індексу сили вітру W_s, тобто співвідношення швидкостей течій, які генеруються вітром (u_w) та плавучістю (u_s):

$$W_s = u_w/u_s, \qquad (6)$$

Оцінку середньої по глибині швидкості вітрової течії на мілкому шельфі, з урахуванням співвідношення густини повітря і води та числових значень коефіцієнтів тертя вітру на поверхні і тертя води на дні моря, отримано у вигляді [28]:

$$u_w = 0{,}0265U, \qquad (7)$$

де U – швидкість вітру (м/с). Розглядається лише уздовжберегова складова вектору вітру (її знаки: + супутній, – зустрічний напрямки відносно поширення плюму). У випадку ДБГО це, відповідно, східний (направлений на захід) та західний (на схід) напрямки зональної складової вітру. Екманівське відхилення вектору течії від напрямку вітру з глибиною тут знехтуване, тому що за малих глибин існує баланс між поверхневою напругою вітру і тертям води у

дна; це т. зв. фрикційно відрегульований потік (frictionally adjusted flow) [43].

Для обчислення густини води за даними про її температуру і солоність застосовано рівняння стану морської води [44], закладене у програмний комплекс ODV [42].

Середні річні і місячні величини солоності води та швидкості вітру, а також сезонні рози повторюваності вітру за напрямками отримано за даними спостережень 1960-2010 років на МГ Очаків. До оцінок аномалій густини води (плавучості) плюму залучені дані про фонову температуру і солоність морської води на шельфі між Кінбурнською протокою та Одеською затокою з монографії [6]. Вхідні дані для розрахунків за формулами (1) – (7) зведені в табл. 1. Морфометричні параметри лиману і протоки наведені у попередньому розділі.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

4.1 Солоність і температура ДБГО

На рис. 2 представлені середні річні та сезонні карти солоності і температури води (без зими) на поверхні Дніпровсько-Бузької гирлової області. Перш за все слід відзначити, що вплив річкового стоку слабко проявляється в полі температури води, а влітку (червень – серпень) поверхнева вода ДБЛ та прилеглого моря практично горизонтально однорідна по температурі.

Можна також помітити, що впродовж року температура змінюється від 14 – 16 ºС навесні до 22 – 23 ºС влітку, потім до 16 – 18 ºС. У середньому за рік (без зими) температура води на поверхні ДБЛ знаходиться на рівні 18 – 20 ºС. Ніяких горизонтальних градієнтів температури між лиманом та прилеглим морем на масштабах середньо-багаторічної сезонної мінливості не існує.

Поле поверхневої солоності води ДБЛ, навпаки, демонструє яскравий прояв розпріснення під дією річкового стоку, у першу чергу р. Дніпро. Середньорічний (без зими) розподіл солоності дає уявлення про цілковите поширення майже прісної води на поверхні від дельти Дніпра до районів Сакенської та Кінбурнської проток, де солоність набуває значень понад 2 ‰ і досягає величини близько 6 ‰ у Кінбурнській протоці. Далі на захід уздовж берега моря витягнуто шлейф трансформованої води з солоністю ≥ 6 ‰, що простягається за межі області спостережень. З південного боку він відокремлений від морських вод фронтом з центральною ізохалиною 10 ‰.

Влітку та восени поверхневий фронт первинної трансформації (ізохалина 10 ‰) дещо розмивається та притискається ближче до Кінбурнської протоки в умовах зменшення річкового стоку та літнього посилення західної складової приземного вітру (як буде показано далі). Внаслідок збільшення впливу морських вод солоність ДБЛ збільшується до 6 – 7 ‰, проте верхів'я Дніпровського лиману залишається під впливом прісної води дельти Дніпра.

Середній вертикальний розподіл солоності й температури впродовж Дніпровського лиману для усього року (без зими) представлений на рис. 3, а сезонні розрізи – на рис. 4 – 6.

Слід пояснити, не вдаючись до подробиць, що міжнародним керівництвом [44] рекомендовано використовувати термін «практична солоність» (PSAL), визначення якої тісно пов'язане з вимірюванням електропровідності. Замість тисячних часток (проміле, ‰, або г/кг), які використовуються для абсолютної солоності і застосовуються у вітчизняній практиці, практичну солоність вимірюють в «одиницях практичної солоності» (practical salinity units, P.S.U.), які кількісно співпадають з проміле. Тому на рис. 3 – 6, генерованих програмним комплексом ODV [42], шкала солоності позначена PSAL (P.S.U.). Але в тексті стосовно величин солоності скрізь використовуються проміле, відповідно до ДСТУ 4474:2005 [45].

До побудови розрізів (рис. 3 – 6) залучені усі станції, що потрапляють у смугу, співставну з середньою шириною ДЛ, тобто ця тривимірна область стискається у вертикальну площину, витягнуту у зональному напрямку. На розрізах солоності позначено Кінбурнську протоку і середню глибину лиману. Одразу видно, що розподіл солоності і температури нижче цієї глибини обумовлено даними станцій, що потрапляють у судноплавний канал, яким відносно холодна і солона морська вода

Таблиця 1 – Середні багаторічні місячні і річні величини солоності S, температури T, суми витрат річок Дніпра та Південного Бугу Q_r, швидкості вітру W для району витоку перехідних вод з Кінбурнської протоки. S_0, T_0 – солоність і температура фонової морської води; U, V – зональна і меридіональна складові вектору вітру

Table 1 – Average long-term monthly and annual values of salinity S, temperature T, total discharges of the Dnieper and Southern Bug rivers Q_r, and wind speed W for the area of transition water outflow from the Kinburn Strait. S_0, T_0 – salinity and temperature of background seawater; U, V are the zonal and meridional components of the wind vector

Місяць	*S*, ‰	S_0, ‰	*T*, °C	T_0, °C	Q_r, м³/с	*W*, м/с	*U*, м/с	*V*, м/с
1	3,44	17,2	2,5	3,7	1546	4,55	0,79	1,2
2	2,98	17,9	2,0	3,0	1743	4,67	1,12	1,12
3	3,22	17,1	2,6	1,5	1899	4,41	1,01	0,7
4	3,53	17,4	6,0	3,5	1947	4,07	0,38	0
5	3,27	17,5	16,0	6,2	1958	3,72	0,09	0,06
6	3,72	17,6	20,0	7,5	1337	3,51	-0,5	0,43
7	4,47	17,8	23,0	8,7	955	3,53	-0,56	0,96
8	5,57	17,9	23,0	9,0	816	3,49	-0,18	1,12
9	6,27	17,7	18,5	12,0	822	3,63	0,01	0,8
10	5,36	16,3	13,8	13,0	1097	3,84	0,45	0,78
11	4,36	16,8	8,5	10,5	1388	4,38	0,84	0,58
12	3,57	17,0	4,5	8,0	1583	4,34	0,5	0,88
Рік	4,15	17,35	11,70	7,22	1424	4,01	0,33	0,72

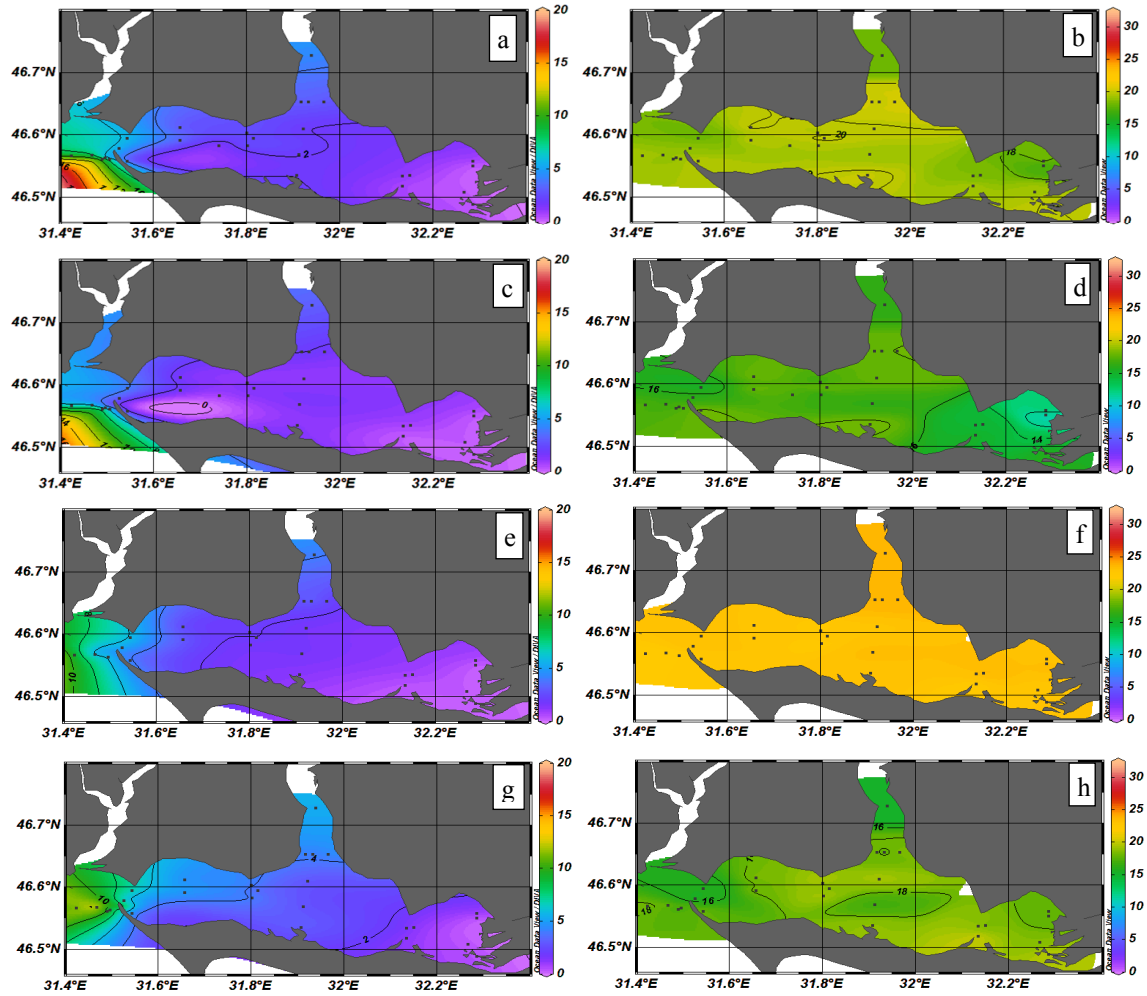


Рис. 2 – Середній багаторічний розподіл солоності, ‰, (a, c, e, g) і температури, °C, (b, d, f, h) води на поверхні Дніпровсько-Бузького лиману та прилеглого району Чорного моря за даними моніторингу гідрометслужби України 1992 – 2020 років: a, b – рік (без зими); c, d – весна (березень-травень); e, f – літо (червень-серпень); g, h – осінь (вересень-листопад)

Fig. 2 – Average long-term distribution of salinity, P.S.U., (a, c, e, g) and temperature, °C, (b, d, f, h) of water on the surface of the Dnieper-Bug estuary and the adjacent Black Sea area according to the monitoring data of the Hydrometeorological Service of Ukraine in 1992 – 2020: a, b – year (without winter); c, d – spring (March-May); e, f – summer (June-August); g, h – autumn (September-November)

потрапляє у верхів'я Дніпровського і Бузького лиманів. Халоклин, який відділяє її від розпрісненої води верхнього шару лиману, залягає нижче середньої глибини ДЛ в усі сезони, тобто морська вода не має значного впливу на вертикальну структуру основної за площею мілинної частини. Це доводить можливість опису Дніпровського лиману на багаторічному і сезонному масштабах мінливості моделлю одношарового резервуару (боксу), де води з двох джерел (дельти Дніпра і прилеглого моря) взаємодіють у горизонтальному напрямку. Результат взаємодії (солоність і об'ємний потік води на виході з ДБЛ) залежить у першу чергу від потужності джерел – річкового стоку та зустрічного потоку морської води через Кінбурнську протоку.

Вочевидь, найбільшого рівня розпріснення Дніпровський лиман досягає навесні, підчас максимального об'єму річкового стоку (рис. 4). Практично уся мілинна частина заповнена майже прісною водою (0-2 ‰) і тільки перед протокою відчувається вплив прилеглого моря, що збільшує солоність до 4 ‰.

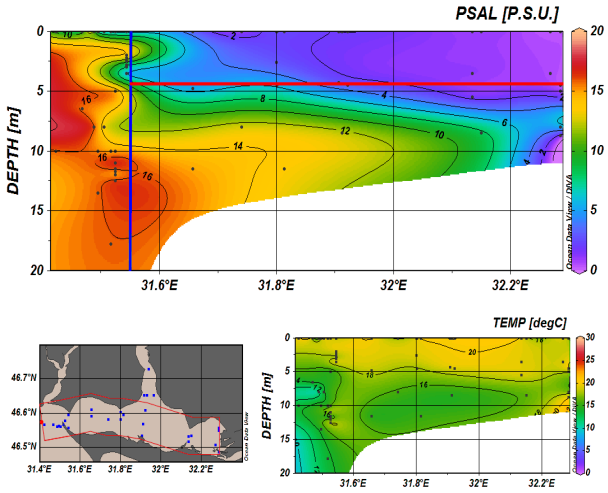


Рис. 3 – Вертикальний розподіл солоності (вгорі) та температури (знизу праворуч) води в Дніпровському лимані та прилеглому районі Чорного моря за даними усіх спостережень 1992-2020 років. Конфігурація області побудови розрізу – червона лінія на карті знизу ліворуч, сині крапки – положення океанографічних станцій. Вертикальна синя лінія на розрізі солоності – положення центру Кінбурнської протоки; горизонтальна червона лінія – середня глибина ДЛ. Крапки на розрізах – глибини вимірювань

Fig. 3 – Vertical distribution of salinity (top) and temperature (bottom right) of water in the Dnieper estuary and the adjacent Black Sea area according to all observations of 1992-2020. The configuration of the section area is the red line on the map from the bottom left, the blue dots are the position of the oceanographic stations. The vertical blue line on the salinity section is the position of the center of the Kinburn Strait; the horizontal red line is the average depth of the Dnipro Liman. Dots on sections – measurement depths

Влітку цей вплив посилюється, ізохалини 2-4 ‰ відступають на схід, товщина поверхневого шлейфу на захід від протоки зменшується до ~ 2 м, натомість помітні прояви потрапляння води з моря (12-14 ‰) не тільки по глибинному каналу, але й у поверхневому шарі Кінбурнської протоки (рис. 5).

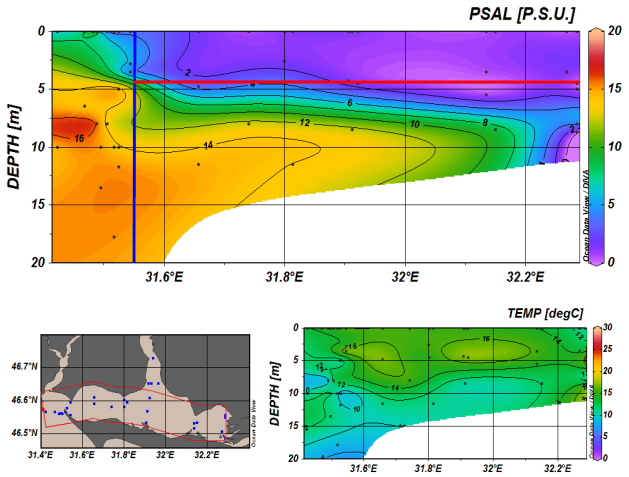


Рис. 4 – Вертикальний розподіл солоності (вгорі) та температури (знизу праворуч) води в Дніпровському лимані та прилеглому районі Чорного моря за даними спостережень у березні-травні 1992-2020 років (див. пояснення на рис. 3)

Fig. 4 – Vertical distribution of salinity (top) and temperature (bottom right) of water in the Dnieper estuary and the adjacent Black Sea area according to observations in March-May 1992-2020 (see explanation in Fig. 3)

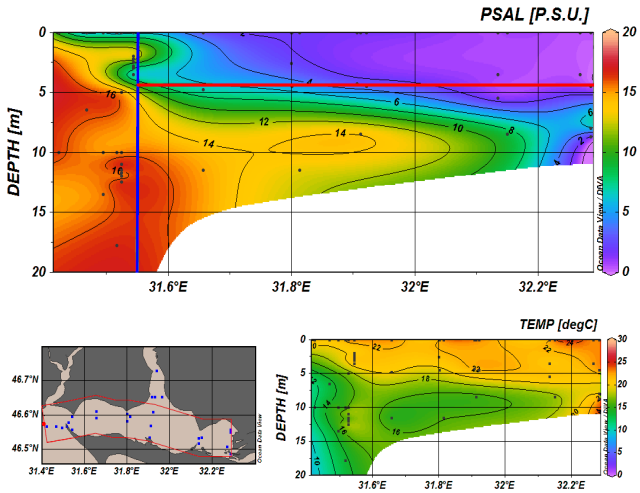


Рис. 5 – Вертикальний розподіл солоності (вгорі) та температури (знизу праворуч) води в Дніпровському лимані та прилеглому районі Чорного моря за даними спостережень у червні-серпні 1992-2020 років (див. пояснення на рис. 3)

Fig. 5 – Vertical distribution of salinity (top) and temperature (bottom right) of water in the Dnieper estuary and the adjacent area of the Black Sea according to observations in June-August 1992-2020 (see explanation in Fig. 3)

Цей процес продовжується і восени, досягаючи ще більш помітного результату осолонення верхнього шару ДЛ і послаблення прояву поверхневого розпріснення за його західною межею (рис. 6).

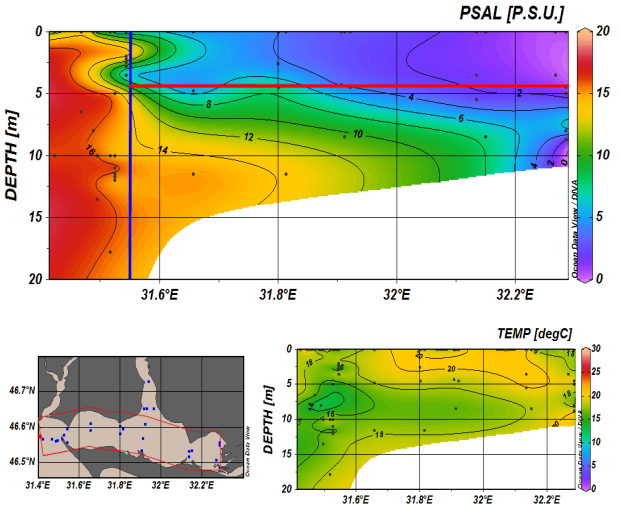


Рис. 6 – Вертикальний розподіл солоності (вгорі) та температури (знизу праворуч) води в Дніпровському лимані та прилеглому районі Чорного моря за даними спостережень у вересні-листопаді 1992-2020 років (див. пояснення на рис. 3)

Fig. 6 – Vertical distribution of salinity (top) and temperature (bottom right) of water in the Dnieper estuary and the adjacent area of the Black Sea according to observations in September-November 1992-2020 (see explanation in Fig. 3)

S-подібна конфігурація ізохалин в районі Кінбурнської протоки на середньорічному (рис. 3), літньому (рис. 5) та осінньому (рис. 6) розрізах може пояснюватися витіканням більш легкої лиманної води у тонкому поверхневому шарі 0-2 м та зустрічним втіканням морської води у шарі 2-3 м. Але язик розпрісненої води на цих розрізах відзначається також і на глибинах 3-4 м, що означає нестійкість стратифікації. Скоріше за все, цей ефект є проявом стискання тривимірного розподілу у вертикальну площину. Натяк на те, що морська вода потрапляє до лиману у північній частині протоки, є на картах поверхневої солоності (рис. 2). Інакше кажучи, при осередненні даних океанографічних станцій, що потрапляють в область побудови розрізу, на зображення генерального витоку лиманної води накладається втікання більш солоної води з боку моря. Це пов'язане як зі зменшенням об'єму річкового стоку влітку і восени, так і збільшенням впливу західної складової локального вітру.

4.2 Показники впливу вітру

На рис. 7 показані сезонні рози вітру, побудовані за даними МГ Очаків.

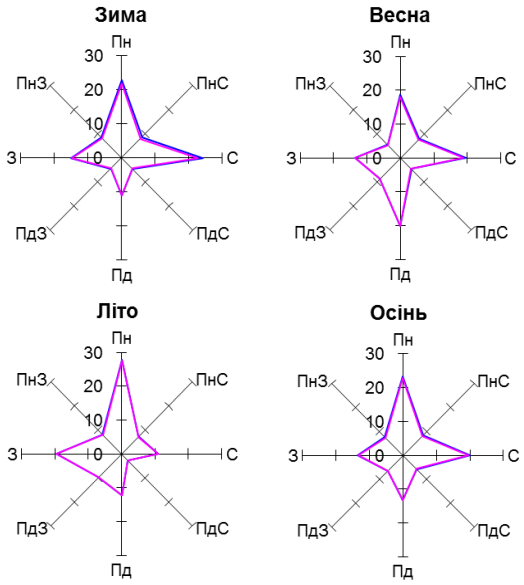


Рис. 7 – Середні сезонні повторюваності напрямків вітру швидкістю 1-10 м/с (рожева лінія) та 1-20 м/с (фіолетова лінія) за даними спостережень МГ Очаків 1960-2010 років

Fig. 7 – Average seasonal repeatability of wind directions at a speed of 1-10 m/s (pink line) and 1-20 m/s (purple line) according to observations of station Ochakov in 1960-2010: winter, spring (top) and summer, autumn (bottom)

Перш за все слід зазначити, що повторюваність вітрів в усьому діапазоні швидкості 1-20 м/с практично співпадає з повторюваністю слабких і помірних вітрів 1-10 м/с на усіх напрямках. Це свідчить про відсутність впливу штормових вітрів на кліматичну картину приземної динаміки атмосфери у цьому районі. Середньорічна роза вітру тут не показана, тому що вона майже співпадає з осінньою.

Порівняння роз вітру, побудованих окремо за даними 1960-1990 років з такими для 1991-2010 років показало, що кліматичні зміни не торкнулися структури повторюваності напрямків вітру в районі Кінбурнської протоки. Ці зміни проявилися лише у зменшенні середньої багаторічної швидкості вітру з 4,2 до 3,4 м/с у середньому за рік, та з 3,7-5,1 до 2,8-3,8 м/с для середніх місячних швидкостей. Тобто у цьому районі також спостерігалося загальне послаблення вітрового поля, як і в цілому над Чорним морем [6, 46].

У подальшому аналізі використовуються оцінки середньої швидкості вітру W за період 1960-2010 рр., представлені у табл. 1.

Таблиця 2 – Середні багаторічні місячні й річні оцінки показників динаміки і структури шлейфу перехідних вод ДБГО, розрахованих по формулах (1) – (7) за даними табл. 1
Table 2 – Average long-term monthly and annual estimates of indicators of the dynamics and structure of the plume of transition waters of the DBGO, calculated according to formulas (1) – (7) according to the data in Table 1

Місяць	g'_r, м/с^2	Ri_e	F_r	Q_{out}, м^3/с	g', м/с^2	F	Rd, км	H_b, м	Y, км	W_s
1	0,133	9,67	0,039	1938	0,106	0,181	6,366	1,97	27,084	0,99
2	0,138	10,52	0,043	2096	0,115	0,187	6,641	1,96	28,257	0,94
3	0,133	13,04	0,048	2344	0,107	0,217	6,416	2,15	27,326	0,79
4	0,134	17,24	0,049	2440	0,107	0,226	6,409	2,20	27,309	0,70
5	0,143	24,17	0,048	2359	0,119	0,207	6,745	2,05	28,719	0,66
6	0,150	20,56	0,032	1636	0,122	0,142	6,846	1,68	29,093	-0,90
7	0,157	15,10	0,022	1208	0,124	0,104	6,886	1,44	29,242	-1,23
8	0,157	13,38	0,019	1102	0,116	0,098	6,670	1,42	28,322	-1,33
9	0,142	10,84	0,020	1219	0,096	0,119	6,058	1,64	25,731	1,26
10	0,123	10,57	0,029	1628	0,083	0,172	5,630	2,04	23,943	0,99
11	0,125	9,16	0,036	1891	0,092	0,189	5,923	2,09	25,204	0,98
12	0,128	10,99	0,041	2021	0,100	0,194	6,191	2,07	26,348	0,91
Рік	0,138	13,77	0,036	1823	0,107	0,169	6,398	1,89	27,215	0,40

Зональна U і меридіональна V складові вектору вітру суттєво занижені за величиною через взаємну компенсацію компонент різного знаку при багаторічному осередненні. Для аналізу мають сенс лише знаки середніх складових: плюс – східна і північна, мінус – західна і південна відповідно для зональної і меридіональної складових.

Як видно з рис. 7, взимку в Очакові переважають східні й північні вітри, що сприяє виносу з ДБЛ води і дрейфуючого льоду на схід і південь. Коли навесні зростає об'єм річкового стоку, повторюваність сприятливих для виносу з лиману вітрів дещо знижується, натомість зростає внесок південного вітру, який, разом зі східним вітром, сприяє нагону води до північного узбережжя ПЗЧМ. Влітку, навпаки, зростає повторюваність північних і західних вітрів, які створюють умови для відгону води від берегів і спрямування шлейфу розпрісненої води на схід, до Кінбурнської протоки та на південь від неї. Восени знов зменшується повторюваність західного вітру і побільшує кількість випадків східного. Але структура вод в лимані і протоці суттєво не змінюється відносно літньої (рис. 2, 5, 6).

4.3 Кількісні показники структури і динаміки перехідних вод

Якісний аналіз характеру і сезонної мінливості формування і поширення розпріснених вод в системі ДБГО може бути суттєво підкріплений результатами розрахунків розмірних і безрозмірних критеріїв (табл. 2). На рис. 8 показано сезонний хід основних показників структури і динаміки перехідних вод.

Стовпчики 2-4 табл. 2 містять параметри структури перехідних вод безпосередньо в ДБЛ (сумарний притік річкової води – в стовпчику 6 табл. 1). Естуарне число Річардсона Ri_e протягом року набагато більше одиниці, тобто вплив річкового притоку значно переважає процес турбулентного вітрового перемішування при даних величинах плавучості і приведеної гравітації g'_r. Ця перевага сягає понад 24 у травні і зменшується до 9-11 взимку (табл. 2, рис. 8). Число Фруда F_r для річкового притоку не перевищує 0,05 в максимумі (квітень), тобто потік занадто далекий від критичного.

Припущення горизонтальної і вертикальної квазіоднорідності води верхнього (мілинного) шару ДБЛ підтверджується картами і розрізами (рис. 2-6). Таким чином, оцінка Q_{out} за допомогою формули Кнудсена (3) є правомірною як з емпіричних, так і теоретичних міркувань. Сезонні зміни Q_{out} відповідають синусоїдному ходу Q_r, тому його не наведено на рис. 8.

У стовпчиках 5-10 табл. 2 наведено величини, які безпосередньо відносяться до шлейфу перехідних вод ДБЛ, що поширюються у прилегле море. Їхня плавучість зменшується порівняно з річковою водою, а сезонні зміни визначаються не тільки зменшенням або зростанням солоності впродовж року, але й коливаннями температури, які однаково діють на весь простір лиману, як видно з рис. 2-6.

З лютого по квітень контраст густини води плюму відносно фонової морської води зменшується через термічне охолодження (зростання густини) поверхневої води, далі плавучість зростає через розпріснення і одночасний прогрів води, досягаючи максимуму в липні, після чого зменшується до мінімуму в жовтні під впливом зростання солоності внаслідок взаємодії вод плюму і навколишнього моря, а також зростання температури фонової морської води. У листопаді-січні знов плавучість зростає завдяки притоку річкових вод і посилення східної складової вітру, що витісняє морські води з лиману. При тому охолодження води в цей період не може пересилити внесок розпріснення у величину густини перехідної води.

Число Фруда для Кінбурнської протоки збільшується порівняно з верхів'ям лиману, але все ж значно менше від критичного. Це говорить про відносно великий горизонтальний масштаб плюму і його джерела та відсутність швидкого перемішування з морськими водами [26]. Сезонні зміни F мають синусоїдний характер, подібний до змін річкового стоку, з максимумом в квітні і мінімумом в серпні.

Бароклинний радіус деформації Россбі визначає масштаб вихрових утворювань у залежності від співвідношення сил плавучості і Коріоліса. У даному випадку антициклонічний вихор, який може утворюватися після виходу плюму з Кінбурнської протоки, має середній річний радіус 6,4 км. Його сезонний хід відтворює форму кривої плавучості (приведеної гравітації g').

Такий же вигляд сезонної мінливості має і показник відстані від берега Y, на яку може рухатися плюм. Його оцінка у середньому за рік складає 25,2 км; максимум – 29,2 км у липні, мінімум – 23,9 у жовтні.

При існуючій конфігурації берегів ПЗЧМ і ДБЛ і майже нульовому куті випуску плюму з протоки відносно генерального напряму берегової лінії, Y є також оцінкою відстані поширення плюму уздовж берега, у напрямку Одеської затоки. У середньому багаторічному вимірі ця відстань навіть влітку не перевищує половини відстані до Одеси. Потраплянню сюди перехідних вод ДБЛ можуть сприяти лише супутні вітрові течії.

Показник H_b як у середньому за рік (1,9 м), так і в окремі місяці не досягає навіть мінімальної глибини Кінбурнської протоки (3,7 м). Отже, відповідно до теорії [29], формується чисто поверхнево-адвективний плюм, який за відсутності вітру і фонової течії може досягати відстані від берега, у середньому, не менш, ніж 25,2 км.

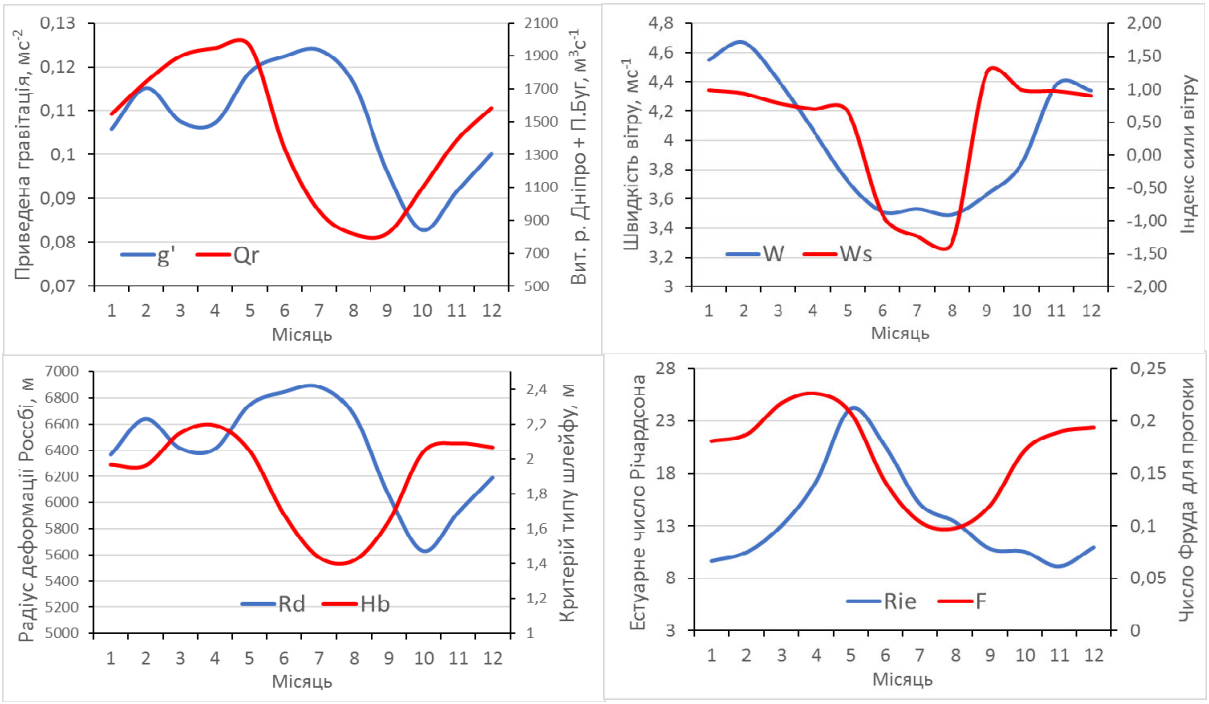


Рис. 8 – Сезонний хід показників структури і динаміки перехідних вод Дніпровсько-Бузького естуарію за даними спостережень 1960-2010 років. На графіках сині криві відносяться до лівих шкал, червоні – до правих

Fig. 8 – Seasonal changes of indicators of the structure and dynamics of the Dnieper-Bug estuary transitional waters according to observations of 1960-2010. On the charts, the blue curves refer to the left scales, the red curves to the right scales

Сезонний хід більшою мірою обумовлений синусоїдним сезонним ходом річкового стоку, лише з листопада по лютий він порушується впливом параметра плавучості.

Для уникнення заниження оцінки впливу вітрових течій індекс сили вітру розраховано за середніми величинами модуля швидкості вітру у припущенні, що існує тільки зональна складова вектору вітра. Її знак (напрямок) визначався знаком осередненої складової *U* (табл. 1). Вітрова активність значно менше у весняно-літній сезон, ніж пізньої осені та взимку. Притому з червня по серпень переважає від'ємний знак зональної складової вітру, що сприяє переносу води на схід або гальмує західну течію. Абсолютна величина індексу сили вітру показує, що його вплив рівноважний з впливом сил плавучості і Коріоліса в осінньо-зимовий період (з жовтня по лютий), плавно знижується навесні (до травня), потім суттєво зростає і навіть перевищує 1 у липні-вересні, маючи у червні-серпні зворотний знак. Якщо взяти до уваги меридіональну складову вітру (рис. 7), то влітку вона має найбільшу повторюваність і сприяє переносу перехідної води у південному напрямку, тобто відтискає шлейф від берега. Разом ці дані свідчать, що у середньо-багаторічному масштабі головним чинником літньої динаміки шлейфу стає вітер і генеровані їм течії на шельфі Чорного моря поблизу Кінбурнської протоки, які перешкоджають поширенню перехідних вод на захід уздовж берега, відтискаючи їх у бік лиману та на південь від нього. Це не заперечує можливості іншої поведінки плюму, обумовленої збільшенням об'єму річкового стоку та синоптичною мінливістю поля вітру в конкретні роки і місяці.

5 ВИСНОВКИ

1) Вперше шляхом узагальнення даних багаторічних гідрометеорологічних спостережень та експедиційних досліджень вивчено середню багаторічну структуру і динаміку перехідних вод в системі Дніпровсько-Бузької гирлової області до руйнування греблі Каховської ГЕС. Аналіз попередніх досліджень трансформації річкових вод у Чорному морі та динаміки плавучих шлейфів в інших районах прибережної смуги Світового океану дозволяє встановити зовнішньою межею перехідних вод ПЗЧМ ізохалину 14 ‰.

2) Середні річні й сезонні карти та розрізи температури і солоності дають уявлення про горизонтальну і вертикальну термохалинну структуру ДБГО та її внутрішньорічну мінливість. Протягом року (без урахування зимового сезону) в ДБЛ підтримується квазіоднорідний по температурі і солоності верхній шар, який заповнює майже весь об'єм лиману, окрім вузького судноплавного каналу, яким надходять морські води і в режимі сольового клину досягають верхів'їв ДЛ та БЛ. Пікноклин на межі верхнього розпрісненого і нижнього солоного шарів залягає нижче середньої глибини ДЛ в усі сезони, тобто морська вода каналу не має значного впливу на вертикальну структуру верхнього шару. Це доводить можливість опису Дніпровського лиману моделлю одношарового резервуару (боксу), де води дельти Дніпра і прилеглого моря взаємодіють у горизонтальному напрямку. Переважання річкового стоку над вертикальною турбулентністю в процесі формування плавучості підтверджується високими значеннями естуарного числа Річардсона.

3) Найвищій ступінь розпріснення ДЛ і виносу перехідної води з Кінбурнської протоки відзначається навесні, в умовах зростання об'єму річкового стоку і переважання вітру зі сходу. При цьому збільшення повторюваності південного вітру сприяє притисканню плюму до узбережжя ПЗЧМ за межами лиману. Влітку посилюється вплив морських вод на ДБЛ через зменшення річкового стоку та збільшення повторюваності західного вітру. Восени зменшується повторюваність західного вітру і побільшує кількість випадків східного, але структура вод продовжує змінюватися у бік зростання солоності води лиману і притискання фронту первинної трансформації (ізохалини 10 ‰) до Кінбурнської протоки.

4) Застосування критеріїв визначення характеру плюму для витоку з Дніпровсько-Бузького лиману показало, що естуарій продукує шлейф (плюм) проміжних вод, які мають поверхнево-адвективний характер, зазнаючи впливу сил плавучості, Коріоліса та вітро-хвильового перемішування, без ефекту тертя у придонному граничному шарі. У середньому багаторічному вимірі відстань, на яку поширюється плюм під дією лише сил плавучості і Коріоліса, навіть влітку не перевищує половини шляху до Одеської затоки. Потраплянню туди перехідних вод ДБЛ можуть сприяти лише супутні вітрові течії.

5) Індекс сили вітру та діаграми

повторюваності вітру за напрямками свідчать, що головним чинником літньої динаміки шлейфу стає вітер і генеровані ним течії, які перешкоджають поширенню перехідних вод на захід уздовж берега, відтискаючи їх у бік лиману та на південь від нього. Це не заперечує можливості іншої поведінки плюму, обумовленої збільшенням об'єму річкового стоку та синоптичною мінливістю поля вітру в конкретні роки і місяці. Наприклад, аномально високий об'єм дніпровської води, винесений в море після руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 р., зумовив швидке (протягом двох діб) просування розпріснених вод від ДБЛ до Одеської затоки і далі на південний захід.

ПОДЯКИ

Дослідження здійснено в УкрГМІ в рамках виконання НДР 9/21 «Динаміка перехідних вод у системах Дністровського та Дніпровсько-Бузького лиманів за даними спостережень та математичного моделювання» (2022–2024 рр., номер державної реєстрації 0122U002444).

Автор висловлює подяку працівникам Миколаївського ЦГМ ДСНС України за невтомну багаторічну працю з отримання експедиційних і берегових гідрометеорологічних даних, що стали основою даної роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Джаошвили Ш. Реки Черного моря : монография. Тбилиси, 2003. 186 с.
2. Большаков В. С. Трансформация речных вод в Черном море : монография. Киев: Наук. Думка, 1970. 328 с.
3. Ильин Ю. П. Распространение речных вод. *Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный* / под ред. В.А. Иванова, С.В. Гошовского. Севастополь: МГИ НАНУ, 1999. С. 59-73.
4. Иванов В. А., Ильин Ю. П. Атмосферные и гидрологические условия, способствующие распространению речных вод в северо-западной части Черного моря. *Комплексные экологические исследования Черного моря*. Севастополь: МГИ НАНУ, 1995. С. 68-81.
5. Ильин Ю. П. Гидрологический режим распространения речных вод в северо-западной части Черного моря. *Наукові Праці УкрНДГМІ*. 2006. № 255. С. 242-251.
6. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2 : Черное море / Ильин Ю. П. и др. Севастополь, 2012. 420 с.
7. Yankovsky A. E., Lemeshko E. M., Ilyin Y. P. The influence of shelfbreak forcing on the alongshelf penetration of the Danube buoyant water, Black Sea. *Continental Shelf Research.* 2004. 24. Pp. 1083–1098. https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.007
8. Brown W. S. *Introduction to Physical Oceanography. Chapter 8: Estuaries. The School for Marine Science and Technology, UMASS.* 2004. 21 p. URL: http://www.smast.umassd.edu/MAR555_04/pdf/758CHAP8.pdf (дата звернення:11.10.2023)
9. Hansen D. V., Rattray M., Jr. New Dimensions in Estuary Classification. *Limnology and oceanography*. 1966. XI (3). Pp. 319-326.
10. Knudsen M. Ein hydrographischer Lehrsatz. *Ann. Hydrogr. Mar. Meterol.* 1900. 28. Pp. 316-320.
11. Geyer W. R., MacCready P. The Estuarine Circulation. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2014. 46. Pp. 175-197. https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141302.
12. MacCready P., Geyer W. R. Advances in Estuarine Physics. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2010. 2. Pp. 35-58. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081015.
13. Dijkstra Y. M., Schuttelaars H. M., Burchard H. Generation of exchange flows in estuaries by tidal and gravitational eddy viscosity-shear covariance (ESCO). *Journal Of Geophysical Research-Oceans*. 2017. 22(5). Pp. 4217-4237. https://doi.org/10.1002/2016JC012379.
14. Gibson J. R., Najjar R. G. The response of Chesapeake Bay salinity to climate-induced changes in streamflow. *Limnol. Oceanogr.* 2000. 45(8). Pp. 1764-1772.
15. Wong K.-C., Munchow A. Buoyancy forced interaction between estuary and inner shelf: observation. *Continental Shelf Research*. 1995. 15(1). Pp. 59-88.
16. Nash J. D., Kilcher L. F., Moum J. N. Structure and composition of a strongly stratified, tidally pulsed river plume. *J. Geophys. Res.* 2009. 114. C00B12. https://doi.org/10.1029/2008JC005036.
17. Austin J. A. Estimating the mean ocean-bay exchange rate of the Chesapeake Bay. *J. Geophys. Res*. 2002. 107(C11). 3192. Pp. 13-1 – 13-8. https://doi.org/10.1029/2001JC001246.
18. Garvine R. W., Whitney M. M. An estuarine box model of freshwater delivery to the coastal ocean for use in climate models. *Journal of Marine Research.* 2006. 64. Pp.173-194.
19. Energetics in Delaware Bay: Comparison of two box models with observations / Rice A. E., Whitney M. M., Garvine R. W. et al. *J. of Marine Research.* 2008. 66. Pp. 873-898.
20. A box model for representing estuarine physical processes in Earth system models / Sun Q., Whitney M. M., Bryan F.O. et al. *Ocean Modelling*. 2017. 112. Pp. 139-153.
21. A box model to represent estuarine dynamics in mesoscale resolution ocean models / Verri G., Pinardi N., Bryan F. et al. *Ocean Modelling*. 2020. 148. 101587. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101587
22. Chant R. J. Interaction Between Estuaries and Coasts: River Plumes – Their Formation, Transport, and Dispersal. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. 2011. 2. Elsevier, 2011. Pp. 213-235.
23. Garvine R. W. Radial spreading of buoyant, surface plumes in coastal waters. *J. Geophys. Res.* 1984. 89. Pp. 1989-1996.
24. Hetland R. D. Relating river plume structure to vertical mixing. *J. Phys. Oceanogr.* 2005. 35. Pp. 1667–88.
25. Horner-Devine A. R. The bulge circulation in the Columbia River plume. *Cont. Shelf Res.* 2009. 29. Pp. 234–51.
26. Horner-Devine A. R., Hetland R. D., MacDonald D. G. Mixing and Transport in Coastal River Plumes. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2015. 47. Pp. 569-594.
27. O'Donnell J. The dynamics of estuary plumes and fronts. *Contemporary Issues in Estuarine Physics.* Cambridge University Press. 2010. Pp. 186-246.
28. Whitney M. M., Garvine R. W. Wind influence on a coastal buoyant outflow. *J. Geophys. Res.* 2005.110. C03014. https://doi.org/10.1029/2003JC002261.
29. Yankovsky A. E., Chapman D. C. A Simple Theory for the Fate of Buoyant Coastal Discharges. *J. Phys Oceanogr.*

1997. 27. Pp. 1386-1401.
30. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо - Западного Причерноморья: монографія / Ин-т гидробиологии АН УССР. Киев: Наукова думка, 1990. 240 с.
31. Гидрохимические условия и состояние загрязнения вод Днепро-Бугского лимана / Губанов В. И., Монина Т. Л., Андрющенко Б.Ф. и др. *Исследования шельфовой зоны Азово-Черноморского бассейна.* Севастополь, 1995. С. 55-64.
32. Комплексная оценка современного состояния загрязнения морской среды в прибрежных районах северо-западной части Черного моря. / Ильин Ю. П., Клименко Н. П., Мезенцева И. В. и др. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* 8. Севастополь, 2003. С. 236-241.
33. Техногенное загрязнение вод прибрежных районов Черного и Азовского морей в период 1990-1999 гг. / Ильин Ю. П., Клименко Н. П., Рябинин А. И. и др. *Наукові Праці УкрНДГМІ*. 2000. 248. С. 182-189.
34. Ильин Ю. П., Симов В. Г., Хоролич Н. Г. Потоки водообмена в системе Днепро-Бугского лимана по данным измерений. *Материалы научной конференции «Ломоносовские чтения» 2003 года*. Севастополь, 2003. С. 24-25.
35. Коржов Є. І. Антропогенний вплив на екосистему пониззя Дніпра та можливі шляхи його послаблення. *Наукові праці УкрНДГМІ.* 2015. 267. С. 102-108.
36. Коржов Є. І., Гончарова О. В. Формування режиму солоності вод Дніпровсько-Бузької гирлової області під впливом кліматичних змін у сучасний період. *Actual problems of natural sciences: modern scientific discussions.* Collective monography. University of Life Sciences in Lublin. 2020. С. 315-330. https://doi.org/10.30525/978-9934-588-45-7.18
37. Оперативна система прогнозу морського хвилювання у прибережній смузі Азовського та Чорного морів / Осадчий В.І., Фомін В.В., Ільїн Ю.П. та ін. *Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології.* Київ, 2019. С. 116-121.
38. Тучковенко Ю. С. Трехмерная математическая модель качества вод Днепровско-Бугского приустьевого района северо-западной части Черного моря. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* 12. Севастополь, 2005. С. 374-391.
39. Бровченко І. О., Мадерич В. С., Терлецька К. В. Разномасштабное численное моделирование циркуляции в Черном море и Днепробугском лимане. *Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика.* Київ, 2015. С. 89-92.
40. Ilyin Y. Estimation of nutrients transport and metabolism in the Dnipro-Bug estuarine system based on data of the EMODNet Chemistry project. *EMODnet Open Conference, Online, 14-16 June 2021. E-poster.* https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10747.44324.
41. Yurkova I. Y., Ilyin Y. P. Simulation of the nutrient load to the Dnieper-Bug estuary, Ukraine. *"30th Pacem in Maribus" Conference Proceedings*. Kiev, 2004. С. 361-369.
42. Schlitzer R. Ocean Data View. 2020. URL: https://odv.awi.de/en/software/download/ (дата звернення: 10.11.2023)
43. Csanady G. T. The arrested topographic wave. *J. Phys. Oceanogr.* 1978. 8. Pp. 47– 62.
44. The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No.56. UNESCO (English), 2010. 196 p.
45. ДСТУ 4474:2005 Фізична океанологія. Терміни та визначення основних понять. Київ : Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2007. 42 с.
46. Ільїн Ю. П. Кліматичні зміни гідрометеорологічного режиму морів України *:* автореф. дис… д-ра геогр. наук / КНУ ім. Тараса Шевченка. Київ, 2016. 32 с.

REFERENCES

1. Jaoshvili, Sh. (2003). *The rivers of the Black Sea.* Tbilisi.
2. Bol'shakov, V.S. (1970). *Transformatsia rechnykh vod v Chernom more [Transformation of riverine waters in the Black Sea]*. Kiev: Naukova Dumka. (in Russ.)
3. Ilyin, Y.P. (1999). Rasprostranenie rechnykh vod [Expansion of riverine waters]. In: Ivanov, V.A. and Goshovsky, S.V. (eds). *Prirodnye usloviya vzmor'ya reki Dunay i ostrova Zmeinyi [Natural conditions of the seaside of the Danube River and the Snake Island]*. Sevastopol: MHI NASU, pp. 5-73. (in Russ.)
4. Ivanov, V.A. & Ilyin Y.P. (1995). Atmosfernye i gidrologicheskie usloviya, sposobstvuyushchiy rasprostraneniyu rechnykh vod v severo-zapadnoy chasti Chornogo moria [Atmospheric and hydrological conditions that promote riverine water expansion in the north-western part of the Black Sea]. *Kompleksnye ekologicheskie issledovaniya Chornogo moria [Comprehensive Environmental Studies of the Black Sea]*. Sevastopol: MHI NASU, pp. 68-81. (in Russ.)
5. Ilyin, Y.P. (2006). [Hydrological regime of riverine waters expansion in the North-Western part of the Black Sea]. *Naukovi pratsi UkrNDGMI [Scientific Works of UHMI]*, 255, pp. 242-251. (in Russ.)
6. Ilyin, Yu.P. et al. (2012). *Gidrometeorologicheskie usloviya morey Ukrainy [Hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine]. Vol. 2: Chernoe more [Black Sea]*. Sevastopol. (in Russ.)
7. Yankovsky, A.E., Lemeshko, E.M. & Ilyin, Y.P. (2004). The influence of shelfbreak forcing on the alongshelf penetration of the Danube buoyant water, Black sea. *Continental Shelf Research.24*, pp. 1083-1098. https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.007
8. Brown, W.S. (2004). *Introduction to Physical Oceanography. Chapter 8: Estuaries.* The School for Marine Science and Technology, UMASS. URL: http://www.smast.umassd.edu/MAR555_04/pdf/758CHAP8.pdf (Accessed:11.10.2023)
9. Hansen, D.V. & Rattray, M., Jr. (1966). New Dimensions in Estuary Classification. *Limnology and oceanography,* XI(3), pp. 319-326.
10. Knudsen, M. (1900). Ein hydrographischer Lehrsatz. *Ann. Hydrogr. Mar. Meterol.,* 28, pp. 316-320.
11. Geyer, W.R. & MacCready P. (2014). The Estuarine Circulation. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 46, pp. 175-197. https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141302.
12. MacCready, P. & Geyer, W.R. (2010). Advances in Estuarine Physics. *Annu. Rev. Mar. Sci.,* 2, pp. 35-58. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081015.
13. Dijkstra, Y.M., Schuttelaars, H. M. & Burchard, H. (2017). Generation of exchange flows in estuaries by tidal and gravitational eddy viscosity-shear covariance (ESCO). *J. Geophys. Res. – Oceans.*, 22(5), pp. 4217-4237. https://doi.org/10.1002/2016JC012379.
14. Gibson, J.R. & Najjar, R.G. (2000). The response of Chesapeake Bay salinity to climate-induced changes in

streamflow. *Limnol. Oceanogr.,* 45(8), pp. 1764-1772.
15. Wong, K.-C. & Munchow, A. (1995). Buoyancy forced interaction between estuary and inner shelf: observation. *Continental Shelf Research*., 15(1), pp. 59-88.
16. Nash, J.D., Kilcher, L.F. & Moum, J.N. (2009). Structure and composition of a strongly stratified, tidally pulsed river plume. *J. Geophys. Res.*, 114. C00B12. https://doi.org/10.1029/2008JC005036.
17. Austin, J.A. (2002). Estimating the mean ocean-bay exchange rate of the Chesapeake Bay. *J. Geophys. Res.,* 107(C11).3192, pp.13-1 – 13-8. https://doi.org/10.1029/2001JC001246
18. Garvine, R.W. & Whitney, M.M. (2006). An estuarine box model of freshwater delivery to the coastal ocean for use in climate models. *J. Mar. Res.,* 64, pp. 173-194.
19. Rice, A.E. et al. (2008). Energetics in Delaware Bay: Comparison of two box models with observations. *J. Mar. Res.,* 66, pp. 873-898.
20. Sun, Q. et al. (2017). A box model for representing estuarine physical processes in Earth system models. *Ocean Modelling,* 112, pp. 139-153.
21. Verri, G. et al. (2020). A box model to represent estuarine dynamics in mesoscale resolution ocean models. *Ocean Modelling,* 148. 101587.
22. Chant, R.J. (2011). Interaction Between Estuaries and Coasts: River Plumes – Their Formation, Transport, and Dispersal. *Treatise on Estuarine and Coastal Science,* 2, Elsevier, pp. 213-235.
23. Garvine, R.W. (1984). Radial spreading of buoyant, surface plumes in coastal waters. *J. Geophys. Res.,* 89, pp. 1989-1996.
24. Hetland, R.D. (2005). Relating river plume structure to vertical mixing. *J. Phys. Oceanogr.,* 35, pp. 1667-1688.
25. Horner-Devine, A.R. (2009). The bulge circulation in the Columbia River plume. *Cont. Shelf Res.,* 29, pp. 234-51.
26. Horner-Devine, A.R., Hetland, R.D. & MacDonald, D.G. (2015). Mixing and Transport in Coastal River Plumes. *Annu. Rev. Fluid Mech.,* 47, pp. 569-594.
27. O'Donnell, J. (2010). The dynamics of estuary plumes and fronts. *Contemporary Issues in Estuarine Physics.,* Cambridge University Press, pp. 186-246.
28. Whitney, M.M. & Garvine, R.W. (2005). Wind influence on a coastal buoyant outflow. *J. Geophys. Res.,* 110. C03014. https://doi.org/10.1029/2003JC002261.
29. Yankovsky, A.E. & Chapman D.C. (1997). A Simple Theory for the Fate of Buoyant Coastal Discharges. *J. Phys Oceanogr.,* 27, pp. 1386-1401.
30. Timchenko, V.M. (1990). *Ekologo-gidrologicheskie issledovaniya vodoemov Severo-Zapadnogo Prichernomor'ya [Environmental and Hydrological Researches into the Water Bodies in the North-Western Black Sea Region]*. Institute of Hydrobiology of NASU. Kiev: Naukova Dumka. (in Russ.)
31. Gubanov, V.I. et al. (1995). Gidrokhimicheskiye usloviya i sostoyaniye zagryazneniya Dnepro-Bugskogo limana [Hydrochemical conditions and state of pollution of the Dnieper-Bug liman]. *Issledovaniya shelfovoi zony Azovo-Chernomorskogo basseyna [Investigations of the Azov-Black Sea basin shelf zone]*. Sevastopol, pp. 55-64. (in Russ.)
32. Ilyin, Y.P. et al. (2003). Kompleksnaya otsenka sovremennogo sostoyaniya zagriazneniya morskoy sredy v pribrezhnykh rayonakh severo-zapadnoy chasti Chornogo moria [Comprehensive assessment of the current state of marine pollution in the coastal areas of the north-western part of the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shelfovoy zon i kompleksnoye ispolzovaniye resursov shelfa [Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources]*, vol. 8. Sevastopol, pp. 236-241. (in Russ.)
33. Ilyin, Y.P. et al. (2000). Tekhnogennoye zagriazneniye vod pribrezhnikh rayonov Chornogo i Azovskogo morey v period 1990-1999 gg. [Technogenic pollution of the coastal areas' waters of the Black and Azov Seas in the period 1990-1999]. *Naukovi Pratsi UkrNDGMI [Scientific works of UHMI]*, 248, pp. 182-189. (in Russ.)
34. Ilyin, Y.P., Simov, V.G. & Khorolich, N.G. (2003). Potoki vodoobmena v sisteme Dnepro-Bugskogo limana po dannim izmereniy [Water exchange flows in the Dnieper-Bug liman system by the measurements data]. *Materialy nauchnoy konferentsii "Lomonosovskiye chteniya" 2003 goda [Materials of the scientific conference "Lomonosov Readings" of 2003]*. Sevastopol, pp. 24-24. (in Russ.)
35. Korzhov, E.I. (2015). Antropogennyi vpliv na ekosystemu ponizzia Dnipra ta mozhlivi shliakhy yogo poslablennia [Anthropogenic impact on the ecosystem of the lower reaches of the Dnieper and possible ways to weaken it]. *Naukovi Pratsi UkrNDGMI [Scientific works of UHMI]*, 267, pp. 102-108. (in Ukr.)
36. Korzhov, E.I. & Goncharova, O.V. (2020). Formuvannia rezhimu solonosti vod Dniprovsko-Buzkoi hyrlovoi oblasti pid vplivom klimatychnykh zmin u suchasnyi period [Formation of the salinity regime of the Dnieper-Bug estuary waters under the influence of climate change in the modern period]. *Actual problems of natural sciences: modern scientific discussions:* Collective monography. University of Life Sciences in Lublin, pp. 315-330. (in Ukr.)
37. Osadchiy, V.I. et al. (2019). Operatyvna systema prognozu morskogo khvyliuvannia u pryberezhniy smuzi Azovskogo ta Chornogo moriv [Operational system of marine waves forecasting for the Azov and Black Seas coastal zone]. *Problemy hidrolohii, idrokhimii, hidroekolohii [Problems of hydrology, hydrochemistry, hydroecology]*. Kyiv, pp. 116-121. (in Ukr.)
38. Tuchkovenko, Yu.S. (2005). Trekhmernaya matematicheskaya model' kachestva vod Dneprovsko-Bugskogo priustyevogo rayona severo-zapadnoy chasti Chornogo moria [Three-dimensional mathematical model of water quality of the Dnieper-Bug estuary region of the northwestern part of the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shelfovoy zon i kompleksnoye ispolzovaniye resursov shelfa [Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources]*, 12. Sevastopol, pp. 374-391. (in Russ.)
39. Brovchenko, I.O., Maderich, V.S. & Terletska, K.V. (2015). Raznomasshtabnoye chislennoye modelirovaniye tsirkuliatsii v Chornom more i Dneprobugskom limane [Multi-scale numerical simulation of circulation in the Black Sea and the Dnieper estuary]. *Systemy pidtrimky pryniattia rishen. Teoria i praktyka [Decision support systems. Theory and practice]*. Kyiv, pp. 89-92. (in Russ.)
40. Ilyin, Y. (2021). Estimation of nutrients transport and metabolism in the Dnipro-Bug estuarine system based on data of the EMODNet Chemistry project. *EMODnet Open Conference, Online, 14-16 June 2021.* E-poster. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10747.44324.
41. Yurkova, I.Y., & Ilyin, Y.P. (2004). Simulation of the nutrient load to the Dnieper-Bug estuary, Ukraine. *"30th Pacem in Maribus" Conference Proceedings*. Kiev, pp. 361-369.
42. Schlitzer, R. (2020). Ocean Data View. URL: https://odv.awi.de/en/software/download/ (Acsessed: 10.11.2023)
43. Csanady, G.T. (1978). The arrested topographic wave.

J. Phys. Oceanogr., 8, pp. 47-62.
44. Intergovernmental Oceanographic Commission (2010). *The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Manuals and Guides No.56*, UNESCO (English).
45. State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy. (2007). *DSTU 4474:2005 Fizychna okeanolohiia. Terminy ta vyznachennia osnovnych poniat [State standards of Ukraine 4474:2005: Physical oceanology. Terms and definitions of basic concepts]*. Kyiv. (in Ukr.)
46. Ilyin, Yu.P. (2016). *Klimatychni zminy hidro-meteorologichnoho rezhymu moriv Ukrainy [Climatic changes of hydrometeorological conditions of the seas of Ukraine]*. Abstract of Dr. Sc. in Geography. Taras Shevchenko National University of Kyiv. Kyiv. (in Ukr.)

AVERAGE CONDITION AND SEASONAL VARIABILITY OF THE STRUCTURE AND DYNAMICS OF TRANSITIONAL WATERS IN THE DNIEPER-BUG ESTUARY REGION

Yu. P. Ilyin

Ukrainian Hydrometeorological institute,
Pr. Nauky, 37, 03038, Kyiv, Ukraine, ypilyin@gmail.com

Based on the data of long-term coastal and expeditionary observations, the structure and dynamics of transitional waters in the system of the Dnieper-Bug estuary (the DBE) before the destruction of the Kakhovka HPP are considered as the basis for the future description of changes in the hydrological regime. Average annual and seasonal maps and vertical sections of temperature and salinity are drafted. The article analyzes the main factors of formation and distribution of transitional waters such as river runoff, salinity (density) contrast and surface wind. A number of dimensional and dimensionless criteria and indicators of the transitional water dynamics within and outside the DBE are calculated and analyzed.

The analysis of previous studies of river water transformation in the North-Western part of the Black Sea (NWBS) and dynamics of floating plumes in other areas of the World Ocean's coastal zone allows us to establish a 14 P.S.U. isohaline as the outer limit for transitional waters of the NWBS.

According to the monitoring data of 1992-2020, the highest degree of desalination of the DBE and output of transition water from the Kinburn Strait was observed in spring, under the conditions of increasing volume of river runoff and predominant wind from the east. At the same time, the increasing repeatability of the south wind contributed to pushing the plume towards the coastal area outside the estuary. In summer, the influence of open sea waters on the DBE increased due to decreasing river runoff and increasing frequency of westerly winds.

According to theoretical criteria, under low-wind conditions, the estuary produces a surface-advective plume affected by buoyancy and Coriolis force, with no effect of friction in the bottom boundary layer. The distance over which such plume spreads, even in summer, does not exceed half way from the Kinburn Strait to the Odesa Bay. The ingress thereto of transitional waters of the DBE in spring and autumn can be facilitated by accompanying wind currents.

The main factor of the plume's summer dynamics includes both westerly wind and the currents it generates. The latter prevent the spread of transitional waters to the west along the coast, pushing them towards the estuary and to the south off it. This does not negate the possibility of a different plume behavior due to the increasing volume of river runoff and synoptic variability of the wind field during certain years and months.

Keywords: salinity and temperature of water, transitional waters, plume, buoyancy, river runoff, wind, sea currents

Подання до редакції **: 14. 09. 2023**
Надходження остаточної версії **: 13. 10. 2023**
Публікація статті : **21. 12. 2023**

Ukrainian hydrometeorological journal, 2023, 32, 80-94 doi: 10.31481/uhmj.32.2023.06
ISSN 2311-0902 (print), 2616-7271 (online)

УДК 551.467.313

МІЖРІЧНА МІНЛИВІСТЬ ЛЬОДОВОГО ПОКРИВУ В ПРОТОЦІ ДЕЙВІСА ТА МОРІ ЛАБРАДОР ЗА ПЕРІОД З 1979 ПО 2023 РІК

Е. Є. Малюга[1], Р. В. Гаврилюк[2]

[1] *Національний університет «Одеська морська академія», вул. Дідріхсона, 8, 65000, Одеса, Україна,* eduard241965@gmail.com
http://orcid.org/0009-0005-0039-9837
[2] *Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,* RAIISAGAVR@gmail.com
http://orcid.org/0009-0002-9129-3293

В умовах швидкого розвитку торговельних та транспортних комунікацій, питання навігації в зонах льодового режиму набуває все більшої актуальності. Зокрема, скорочення площі льодового покриву в Канадській Арктиці, в зв'язку з глобальним потеплінням, відкриває сприятливі перспективи для поглиблення розвитку морського судноплавства у цих водах. Враховуючи, що маршрути через Північно-Західний судноплавний прохід найкоротші з усіх, що з'єднують Атлантичний та Тихий океани, стає зрозумілим велике значення і актуальність усіх аспектів даної теми. Особливо це стосується тих, що присвячені дослідженню особливостей появи, формування, концентрації, фізичних характеристик, траєкторії руху криги та прогнозування площі льодового покриву в даному районі, які впливають на умови льодової навігації і є визначальними факторами, пов'язаними з безпекою мореплавства.

В роботі розглянуті деякі з цих питань, а саме розповсюдження льодового покриву в період максимального його розвитку в протоці Дейвіса і морі Лабрадор (тут починаються маршрути через Північно-Західний прохід) і встановлення статистичних зав'язків між розповсюдженням криги і температурами поверхневої води та приземного повітря. Метод дослідження – синоптико-кліматичний і статистичний аналіз числового ряду відхилень крижаного покриву від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2023 рр. у даному районі.

Відповідно до поставленої мети, у дослідженні було оброблено вихідні дані по розподілу крижаного покриву в протоці Дейвіса і морі Лабрадор за період 1979-2023 рр. і проведено його статистичний аналіз. Результати аналізу показали, що в міжрічній мінливості розподілу крижаного покриву за досліджуваний період спостерігається суттєвий статистично значущій від'ємний тренд і наявність циклічних коливань з періодами 3-6, 9, 10 і 13 років. В міжрічній мінливості температури поверхневої води та температури приземного повітря спостерігаються позитивні тренди. Після приведення вихідних рядів до квазістаціонарного виду проведено кореляційний аналіз взаємозв'язків між розподілом крижаного покриву і температурою води та повітря. За результатами аналізу були визначені райони і точки зі статистично значущими коефіцієнтами кореляції між ними протягом року. Виявилось, що найбільші значення коефіцієнтів спостерігаються з грудня по березень, а максимальні припадають на березень.

Систематизація і аналіз крижаного поля в протоці Дейвіса і морі Лабрадор у період максимального розвитку дозволили встановити, що розповсюдження криги між 60° – 55° північної широти було найбільш стабільним за досліджуваний період, а на ділянці нижче 55° північної широти – найменш стабільним.

Результати проведеної роботи відкривають перспективи для розробки методів прогнозування розподілу крижаного покриву в протоці Дейвіса і морі Лабрадор, що дозволить зробити льодову навігацію даного району більш безпечною.

Ключові слова: льодовий покрив; протока Дейвіса; море Лабрадор; Північно-Західний прохід; розповсюдження криги.

1 ВСТУП

За останній час спостерігаються надзвичайно швидкі кліматичні зміни в арктичних регіонах, які спричинили багато наслідків. Зокрема, середня за рік температура повітря зростала в Арктиці в два рази швидше, ніж у світі в цілому. Цей факт отримав назву «арктичне посилення» [1, 2]. Це призвело до того, що з 1979 по 2020 рр. середньорічна площа льодового покриву в Арктиці зменшилася на 2 млн. км ^{2} [3]. Деякі кліматичні моделі навіть прогнозують повне зникнення криги у літні місяці до 2050 р.

[4] і навіть до 2035 р. [5]. Одночасно постала низка проблем для навколишнього середовища [6] не тільки в Арктиці, але й в більш низьких широтах [7], а також збільшилося судноплавство [8] та, як наслідок, дещо зросла аварійність на морських шляхах [9].

Враховуючи вищесказане, вивченню таких змін погодних умов і їх наслідків приділяється достатньо уваги. Відповідно до цілі даного дослідження, розглянемо джерела, присвячені розповсюдженню арктичного льодового покриву взагалі і в протоці Дейвіса та морі Лабрадор зокрема, а також факторам, що на це впливають. Так, в роботі [7] зазначено, що не тільки крижане поле залежить від перенесення тепла течіями Атлантичного океану в напрямку полюсу, але й лід в свою чергу діє на перенесення тепла океаном, однак останні процеси ще недостатньо вивчені. До цього, помічено скорочення площі льодів Баренцева моря у зв'язку з «арктичним посиленням» і потеплінням атлантичної води, що надходить у море [10], в той час, як у Дейвісовій протоці значних змін перенесення тепла не відбулося [11]. За допомогою кліматичної моделі NorESM1- M встановлено, що океан впливає на процеси танення і замерзання льоду більше, ніж атмосфера [12].

Взагалі, в основних питаннях, наприклад, щодо впливу на площу арктичної криги вітру, океанських течій та низьких зимових температур [13], думки більшості вчених одностайні. Але в деталях зустрічаються різні, навіть дещо не співпадаючи точки зору. Так, Heide-Jørgensen M. P. et al. [13] говорять про кореляцію площі льоду з зимовими індексами Північноатлантичної та Арктичної осциляцій, а Smedsrud L. H. et al. [14] і Semenov V. A. et al. [15] такого стійкого зв'язку не виявили. Також, без детальних пояснень, яким чином вони отримані, представлено середні за період з 2002 по 2021 рік коефіцієнти кореляції між концентрацією морської криги (SIC) і температурою поверхні моря (SST) в [16], та сезонні і річні коефіцієнти кореляції між SIC і SST, SIC і температурою приземного повітря (SAT) за період з 1979 по 2017 рік в [17].

Тобто, не зважаючи на достатньо велику увагу наукового товариства приділену проблемам арктичної зони, ще є питання, які потребують більш детального вивчення і узгодження. Деякі з них, а саме пошук статистичного зв'язку між характеристиками льодового покриву в протоці Дейвіса і морі Лабрадор у період максимального поширення криги та факторами, що впливають на їх межирічну мінливість, а також систематизація і аналіз крижаного поля досліджуваного району у цей період, є *метою даної роботи*.

2 ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для аналізу змін крижаного покриву в Дейвісовій протоці та морі Лабрадор з 1979 по 2023 рік використовувалися карти з архіву National Snow and Ice Data Center [18]. Білим кольором на цих картах позначено акваторії, зайняті морським льодом не менше, ніж 15% від загальної площі. Помаранчевим кольором для кожного числа місяця нанесено середню межу розповсюдження льоду на цю дату, обчислену для періоду з 1981 по 2010 рік – median ice edge (MIE) (рис. 1). Аналіз проводився на дату 15 квітня, так як у розглядуваному районі льодовий покрив досягає свого найбільшого поширення у березні-травні [19, 20].

Необхідні для аналізу дані були отримані наступним чином. Безпосередньо на картах, площі крижаного покриву у окремих регіонах або морях не надаються, але наносяться MIE. Вона була обрана в якості відлікової межі. Далі кожна карта за 15 квітня з 1979 по 2023 рік збільшувалася за допомогою графічного редактору. На ній до MIE підраховувалася кількість пікселів синього кольору, тобто, не зайнятих льодом (це було від´ємне значення), та за MIE – кількість пікселів білого кольору, тобто, з льодом (це було додатне значення). Тобто, якщо до межі спостерігається вільна від льоду поверхня води, то це говорить про менше, ніж зазвичай, розповсюдження льоду на цю дату і тому значення від´ємне. Аналогічно, якщо за межею спостерігається крига, то це свідоцтво про більше, ніж зазвичай, розповсюдження і тому значення додатне.

Додатні та від´ємні значення на кожен рік надалі складалися і, таким чином, для подальшого аналізу було створено цифровий ряд аномалій розповсюдження крижаного покриву в досліджуваному районі, представлений у таблиці 1 (слід пам´ятати, що одиниця виміру значення аномалії є умовною, бо отримана при підрахунку пікселів на електронній карті). Також було побудовано графік відхилення крижаного покрову від середньої межі на 15 квітня, за період з 1979 по 2023 рік (рис. 2).

Для кореляційного аналізу використовувалися середньомісячні дані щодо температурі води та повітря SST і SAT (1979 – 2023 рр.) Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF European Reanalysis V5 (ERA5) [0.25°]) [21].

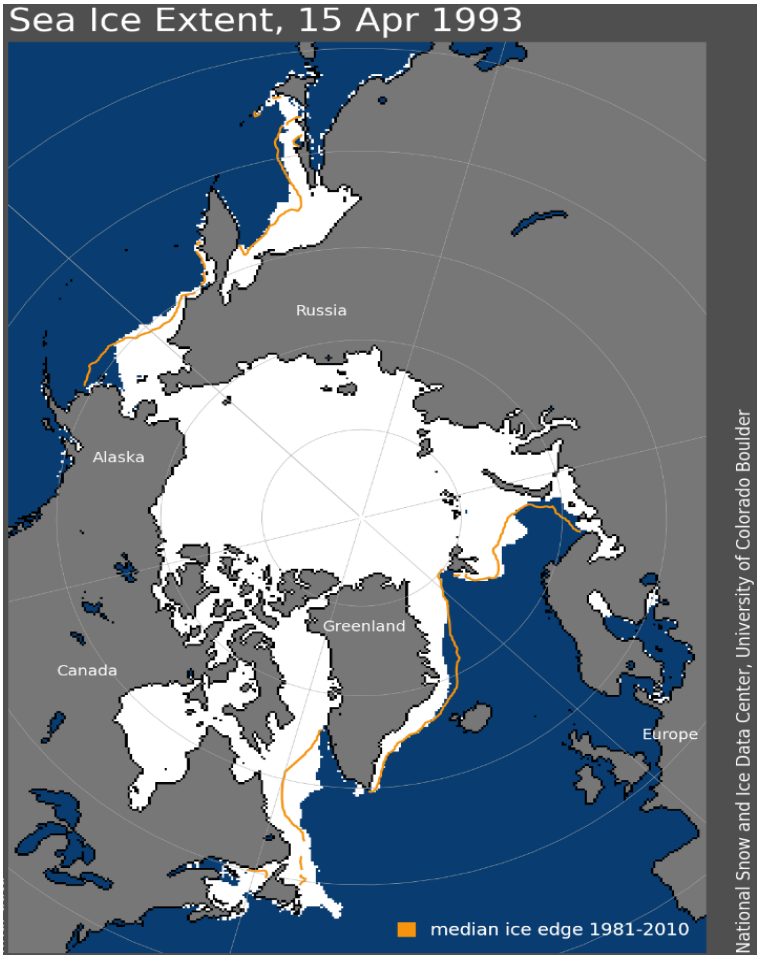


Рис. 1 – Розповсюдження морської криги в північній півкулі на 15.04.93 [18]
Fig. 1 – Distribution of sea ice in the Northern Hemisphere on 04.15.93 [18]

Таблиця 1 – Числовий ряд відхилень крижаного покрову від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2022 рр.
Table 1 - Numerical series of deviations of the ice cover from the average limit on April 15 for the period 1979-2022

Рік	Значення	Рік	Значення	Рік	Значення	Рік	Значення
1979	-2415	1991	5262	2003	392	2015	4690
1980	595	1992	1415	2004	-3451	2016	691
1981	-869	1993	8889	2005	-3628	2017	1481
1982	2982	1994	4542	2006	-3661	2018	-544
1983	10446	1995	3966	2007	-514	2019	-2879
1984	5586	1996	-1728	2008	1750	2020	-3260
1985	4453	1997	604	2009	2233	2021	-3176
1986	-1209	1998	-400	2010	-2335	2022	-749
1987	3727	1999	-1820	2011	-2013	2023	-1261
1988	-1616	2000	-1053	2012	210		
1989	4657	2001	-1440	2013	-3341		
1990	5033	2002	-200	2014	3230		

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Сукупності випадкових величин, що аналізуються, найчастіше подаються у вигляді простого і згрупованого статистичних рядів. Для вивчення мінливості цих величин в часі використовують простий ряд, де вихідні дані розташовані у послідовності, в якій вони були

отримані. Такий ряд представлено в табл. 1 і на рис. 2. Його тривалість складає 45 років, що є достатнім для проведення статистичного аналізу.

З зовнішнього вигляду часового ряду на рис. 2 можна зробити висновок, що відхилення крижаного покриву від середньої межі відчуває суттєвий статистично значущий від´ємний тренд з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0{,}18$. З 1979 по 2007 рік переважали додатні значення аномалій, далі лінія переходить через нуль і з 2008 по 2023 рік вже переважали від´ємні.

Основний максимум графіку спостерігався у 1983 р. (10446), значимі локальні максимуми – у 1987, 1991, 1993 (другий за величиною максимум ряду), 2009 і 2015 рр. Основний мінімум спостерігався у 2006 році (-3661), а значимі локальні мінімуми у 1979, 1988, 1996, 1999, 2010, 2013 і 2020 рр. При порівнянні амплітуд додатних і від´ємних значень помітно, що у додатних вони значно більші. Тобто, за досліджуваний період площа криги за середньою межею (на 15.04) у окремі роки бувала значно більшою, ніж площа, вільна від криги до цієї межі. Це також підтверджується тим, що середнє значення ряду додатне і становить 739.

За візуально однаковими ознаками графік на рис. 2 можна розбити на три частини: 1981-1996, 1996-2005 і 2005-2020 рр. Спільними рисами цих періодів є великі максимуми на початку і кінці строку, а також невеликі максимуми-мінімуми всередині. Перший період триває 15 років, другий 9, третій 15. Тобто, можна зробити два припущення. Або існують цикли з максимумами на початку і завершенні, між якими спостерігаються значно менші зростання-падіння з періодичністю 9-15 років, або більш довгі цикли (періодичністю біля 15 років) перемежаються більш короткими циклами (періодичністю біля 9 років).

Також помітно, що з початку двохтисячних років розбіжність між максимальними додатними і від´ємними значеннями аномалій починає безперервно збільшуватися. Якщо з'єднати максимуми 2000, 2008, 2009 і 2015 рр. та мінімуми 2005, 2006, 2013, 2020 і 2021 рр., то можна побачити, що як позитивні, так і негативні екстремуми майже знаходяться на прямих і ці прямі розходяться одна від одної. Тобто амплітуда коливань графіку на рис. 2 у цей проміжок часу постійно зростає.

У багатьох дослідженнях, присвячених Арктиці, відзначається суттєвий зв´язок льодового покриву з температурами поверхневої води і приземного повітря. На рис.3 і 4 наведено графіки часової мінливості і лінії тренду для температури води і повітря у квадраті 60 – 62,5° N, 52,5 – 55° W за період 1979-2023 рр. Якщо порівняти рис. 2, 3 і 4 можна бачити, що основним і локальним максимумам на рис. 2 найчастіше відповідають мінімуми на рис. 3 і 4 (наприклад, у 1983, 1993, 2008, 2012 і 2015 рр.), а мінімумам на рис. 2 – максимуми на рис. 3 і 4 (у 1981, 1988, 1992, 1996, 2005, 2013, 2023 рр.). Тобто, коливання на графіках рис. 2 і 3 та 4 протифазні, але треба відзначити, що амплітуди сплесків не завжди відповідають одне одному (наприклад, на рис. 2 амплітуди максимумів 2012 і 2015 рр. значно відрізняються, а на рис. 3 і 4 амплітуди мінімумів цих років майже однакові).

Гістограму з полігоном розподілу числового ряду аномалій представлено на рис. 5. З її вигляду також можна підтвердити зроблений вище висновок, що випадки аномально великого розповсюдження криги за МІЕ у даному районі на 15.04 з 1979 по 2023 р. траплялися нечасто. У разі від'ємних значень аналогічні випадки (тобто, дуже значна площа вільної води до МІЕ) не спостерігалися зовсім.

Для приведення числового вихідного ряду до квазістаціонарного виду з метою його подальшого статистичного аналізу, надалі розглядалися не аномалії розповсюдження крижаного покриву (x_1, x_2, …, x_{45}), а їх зміни за рік (річний приріст). Тобто, отримуємо новий ряд річного приросту, в якому буде 44 члена. Він є результатом послідовного віднімання попереднього члену ряду від наступного ($x_2 - x_1$, $x_3 - x_2$, …, $x_{45} - x_{44}$) і набув характер близький до стаціонарного з незначним від'ємним трендом (табл. 2, рис. 6, 7). Така методика була застосована для обробки ряду багаторічних змін рівня Каспійського моря, в якому, як добре відомо, спостерігається суттєвий від'ємний тренд, а її описання наведено в [22].

За допомогою кореляційного аналізу можна виявити зв´язок між двома і більше випадковими величинами. Статистична залежність вважається значущою, якщо коефіцієнт кореляції достатньо високий і не менше, ніж в 6-10 раз перевищує свою похибку, яка дорівнює

$$\sigma = 0{,}67(1 - r^2)\Big/\sqrt{n}\,,$$

де r – коефіцієнт кореляції, а n – кількість членів ряду. Для нашого ряду річного приросту з 44 членами, значущими на рівні 0,01 будуть коефіцієнти кореляції 0,48 і вище.

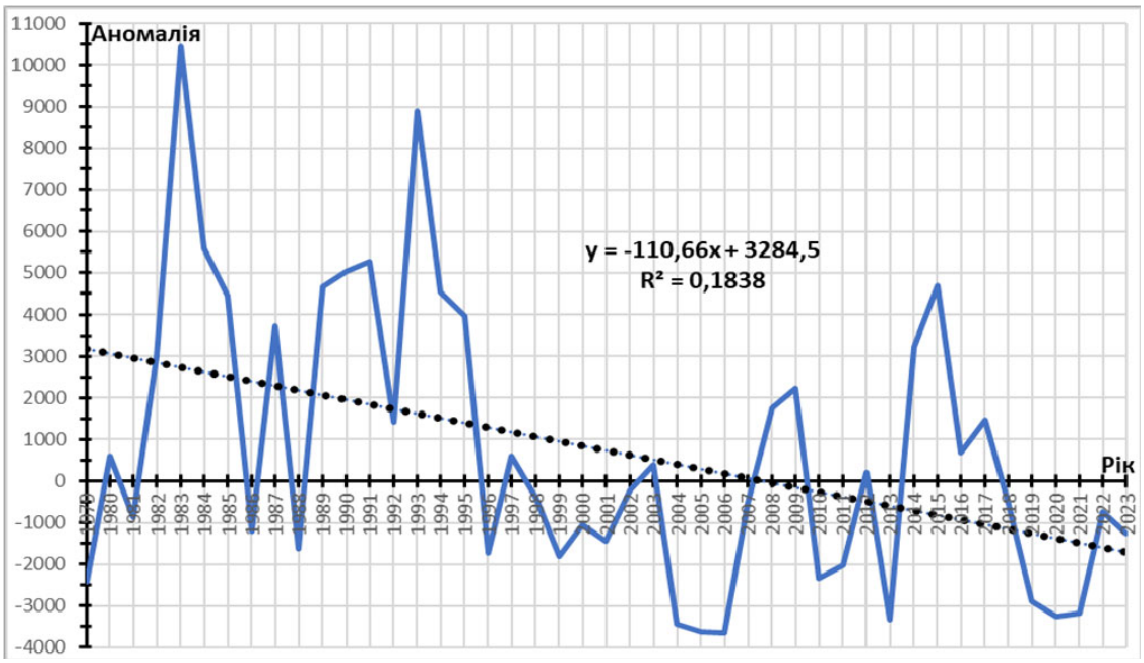


Рис. 2 – Графік відхилень крижаного покриву від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2023 рр. з лінією тренду
Fig. 2 – Graph of deviations of the ice cover from the average limit on April 15 for the period 1979-2023 with a trend line

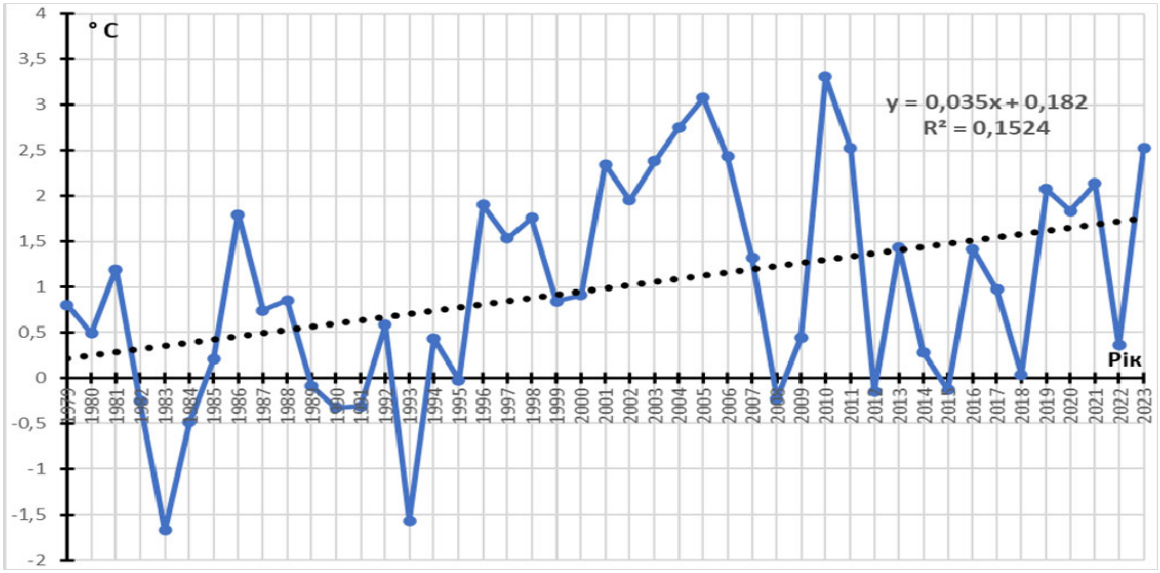


Рис. 3 – Графік середньомісячної температури поверхневої води (SST) для березня у квадраті 60 – 62,5° N, 52,5 – 55° W за період 1979-2023 рр. з лінією тренду

Fig. 3 – Graph of average monthly surface water temperature (SST) in March in the square 60 - 62.5° N, 52.5 - 55° W for the period 1979-2023 with a trend line

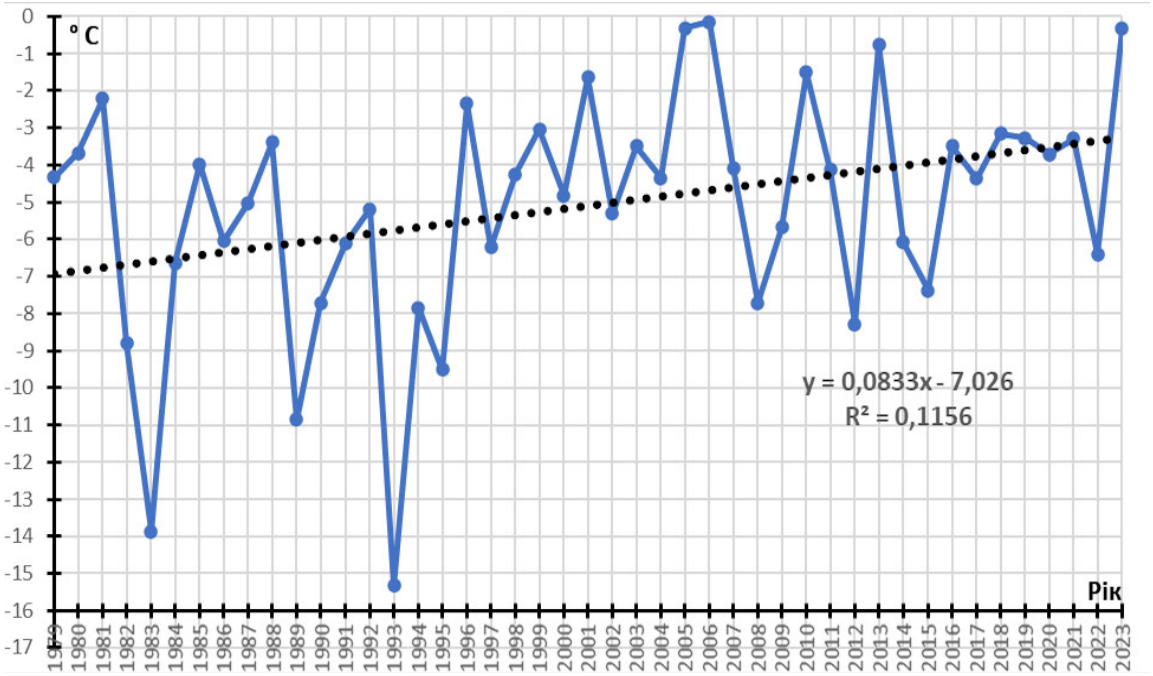


Рис. 4 – Графік середньомісячної температури приземного повітря (SAT) для березня у квадраті 60 – 62,5° N, 52,5 – 55° W за період 1979-2023 рр. з лінією тренду

Fig. 4 – Graph of the average monthly surface air temperature (SAT) in March in the square 60 - 62.5° N, 52.5 - 55° W for the period 1979-2023 with a trend line

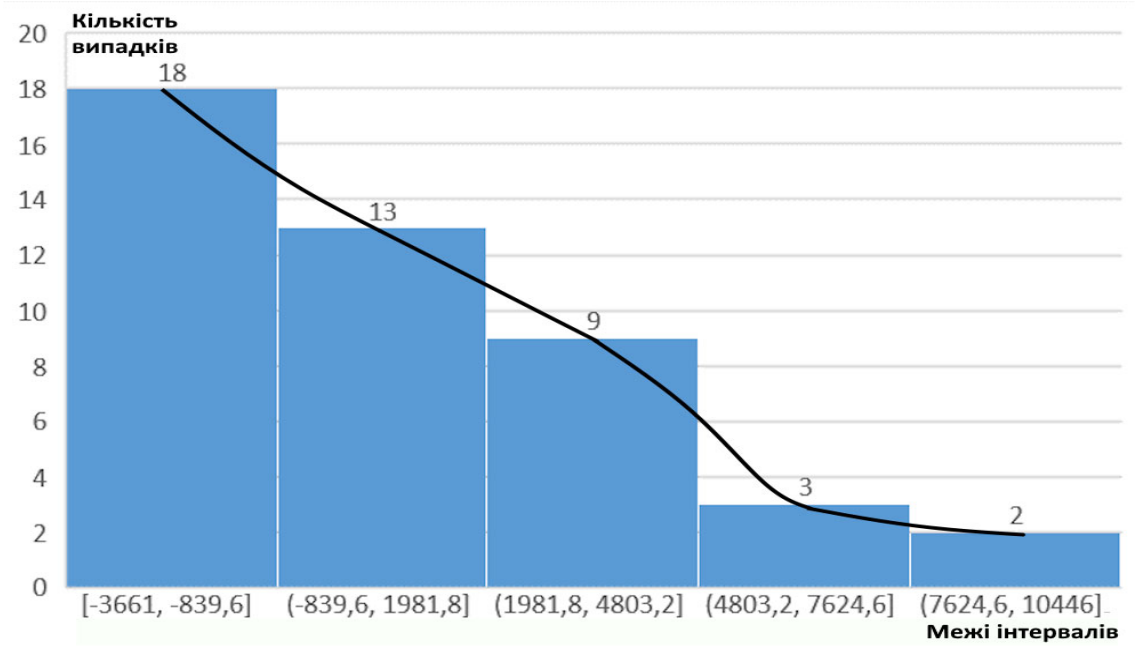


Рис. 5 – Гістограма з полігоном розподілу числового ряду відхилень крижаного покриву від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2023 рр.

Fig. 5 – Histogram with a polygon of the distribution of the numerical series of deviations of the ice cover from the average limit on April 15 for the period 1979-2023

Таблиця 2 – Числовий ряд річного приросту аномалій крижаного покриву від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2023 рр.
Table 2 – The numerical series of the annual increase in ice cover anomalies from the average limit on April 15 for the period 1979-2023

№	Значення	№	Значення	№	Значення	№	Значення	№	Значення
1	3010	10	6273	19	-1004	28	3147	37	-3999
2	-1464	11	376	20	-1420	29	2264	38	790
3	3851	12	229	21	767	30	483	39	-2025
4	7464	13	-3847	22	-387	31	-4568	40	-2335
5	-4860	14	7474	23	1240	32	322	41	-381
6	-1133	15	-4347	24	592	33	2223	42	84
7	-5662	16	-576	25	-3843	34	-3551	43	2427
8	4936	17	-5694	26	-177	35	6571	44	-512
9	-5343	18	2332	27	-33	36	1460		

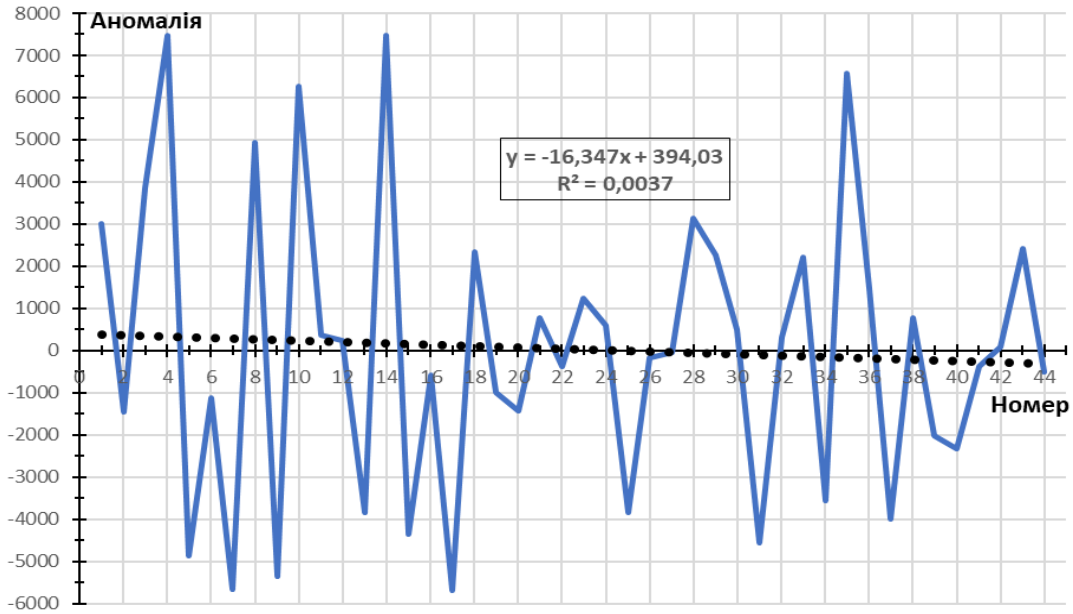


Рис. 6 – Крива річного приросту аномалій крижаного покриву за період 1979-2023 рр. з лінією тренду
Fig. 6 – The curve of the annual growth of ice cover anomalies for the period 1979-2023 with a trend line

Спочатку перевіримо взаємозв´язок членів числового ряду самих із собою зі зсувом у часі. Для цього визначимо коефіцієнти кореляції між незгладженими рядами відхилень льодового покриву від середньої межі (x_1, x_2, …, x_{30}) і (x_2, x_3, …, x_{31}) (зсув 1 рік), рядами (x_1, x_2, …, x_{30}) і (x_3, x_4, …, x_{32}) (зсув 2 роки), рядами (x_1, x_2, …, x_{30}) і (x_4, x_3, …, x_{33}) (зсув 3 роки) і так до рядів (x_1, x_2, …, x_{30}) і (x_{16}, x_3, …, x_{45}) (зсув 15 років) (рис. 8). Як бачимо з рис. 8, ряд аномалій крижаного покриву відчуває циклічні коливання з періодами 3–6, 9, 10 і 13 років.

Далі розглянемо зв'язок ряду річного приросту відхилень, отриманого раніше, з температурою поверхні моря (SST) і температурою приземного повітря на висоті 2 м над рівнем моря (SAT). Числові ряди середніх за місяць значень SST і SAT з 1979 по 2023 рік також були перетворені у ряди річного приросту, аналогічно процедурі з рядом аномалій розповсюдження крижаного покриву, як описано вище.

Спочатку визначаємо коефіцієнти кореляції названих величин з членами ряду річного приросту аномалій на десятиградусних квадратах в Північній Атлантиці (тут і далі для кожного місяця року). Максимальні значення цих показників було отримано у квадраті 50 – 60° N, 40 – 50° W, для SST у грудні – - 0,47 і для SAT також у грудні – - 0,61. Оскільки температура приземного повітря бралася тільки над водною поверхнею, а ділянки суші з аналізу

виключалися, то безпосередньо у морі Лабрадор і протоці Дейвіса це визначення не проводилося.

Потім коефіцієнти кореляції знаходилися вже у п'ятиградусних квадратах. Найвищі показники для обох температур виявилися протоці Дейвіса, в одному й тому ж квадраті – 60 – 65° N, 55 – 60° W. Для SST у березні кореляція становила - 0,63 і для SAT, також у березні, – - 0,72. Подальше зменшення масштабу до 2,5° підвищило результат: - 0,76 для SST і - 0,74 для SAT у березні у квадраті 60 – 62,5° N, 52,5 – 55° W. Надалі квадрати сітки зменшувались до 1° та 0,5° (рис. 9, 10, табл. 3, 4) і, нарешті, знаходилися коефіцієнти кореляції між членами ряду річного приросту та SST і SAT у вузлах сітки з роздільною здатністю 0,5×0,5°. Найкращими для SST виявилися показники - 0,776 (квадрат 60 – 60,5° N, 54,5 – 54° W, березень) і - 0,774 (точка з координатами 60,5° N, 54° W, березень). Для SAT це були - 0,753 (точка з координатами 61° N, 54,5° W, березень) і -0,752 (точка з координатами 60,5° N, 54° W, березень).

З рисунків 9 і 10 видно, що максимальні за рік коефіцієнти кореляції ряду річного приросту, як з SAT, так і з SST, спостерігаються приблизно в одних і тих же районах. Відмінність полягає у тому, що коли більшість коефіцієнтів з SAT перевищує 0,7, то з SST вони зустрічаються значно рідше, а переважають показники від 0,5 до 0,69. Але, не дивлячись на це, найбільше значення кореляції з SST перевищує аналогічне з SAT – -0,78 проти -0,75. Ще можна відмітити відносно велику кореляцію розповсюдження криги на 15 квітня з SST (-0,63 і -0,64) на південний схід від мису Фарвел, у квадраті 58,5 – 59° N, 41,5 – 42,5° W.

Таблиці 3 і 4 демонструють зв'язок величини коефіцієнтів кореляції з місяцем року. Так, їх найбільші значення спостерігаються у березні, трохи нижчі у грудні та ще меші у січні і лютому. Якщо порівняти ці два останні місяці для SST і SAT, то кореляція з температурою повітря більш слабша і виявляється рідше, ніж з температурою води.

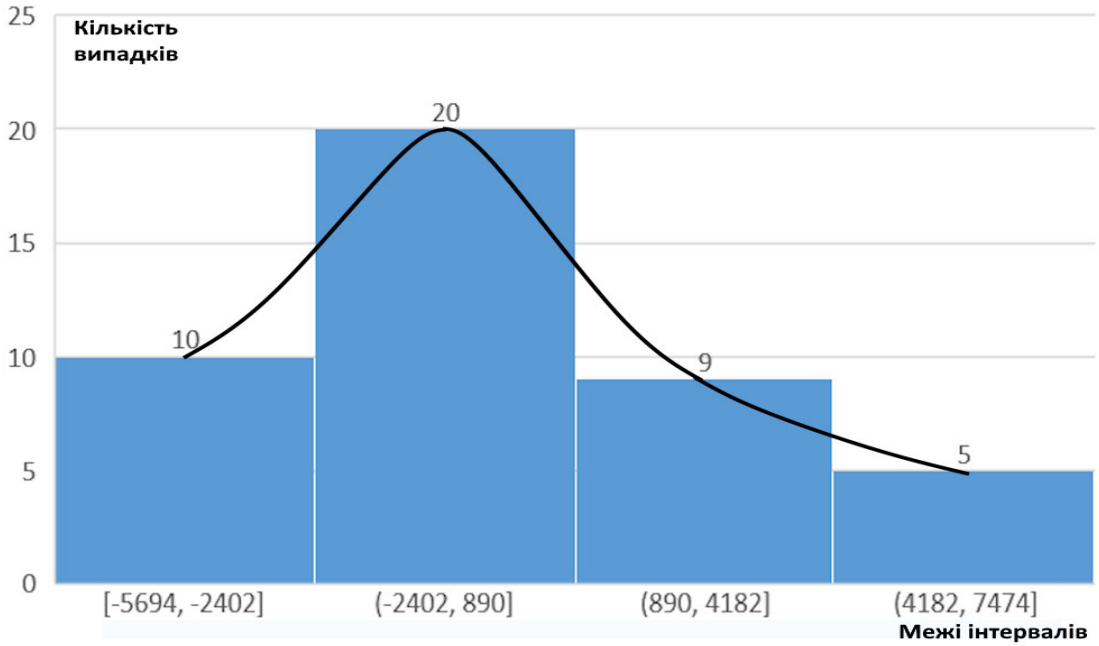


Рис. 7 – Гістограма отриманого ряду річного приросту
Fig. 7 – Histogram of the obtained series of annual growth

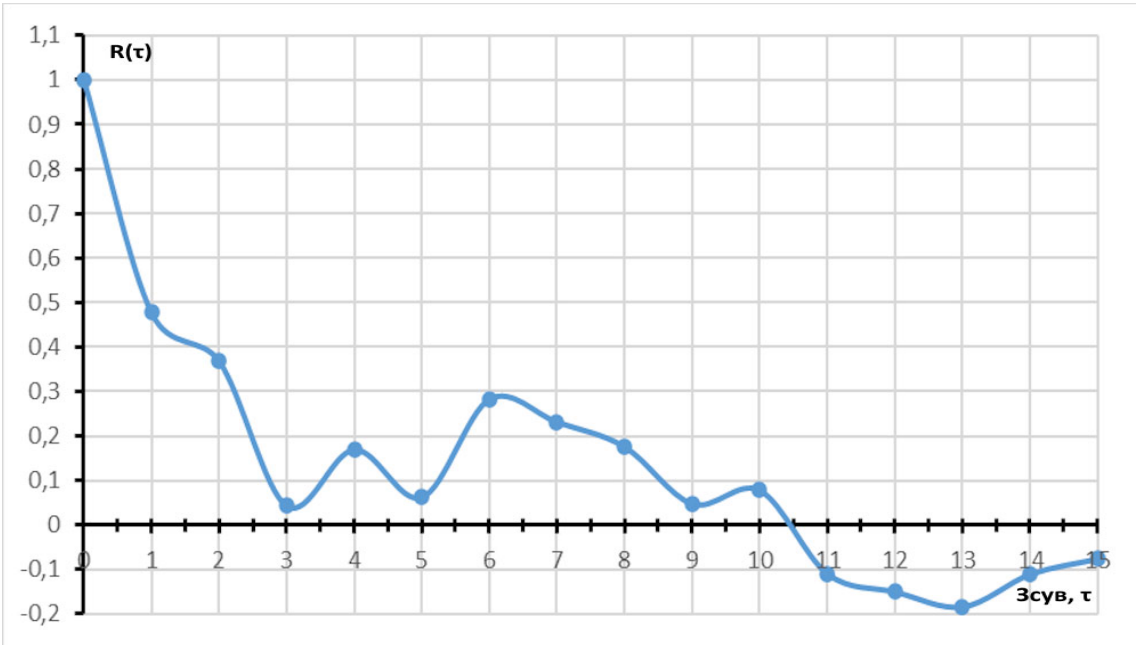


Рис. 8 – Графік автокореляційної функції ряду відхилень льодового покриву від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2023 рр.

Fig. 8 – Graph of the autocorrelation function of a series of deviations of the ice cover from the average limit on April 15 for the period 1979-2023

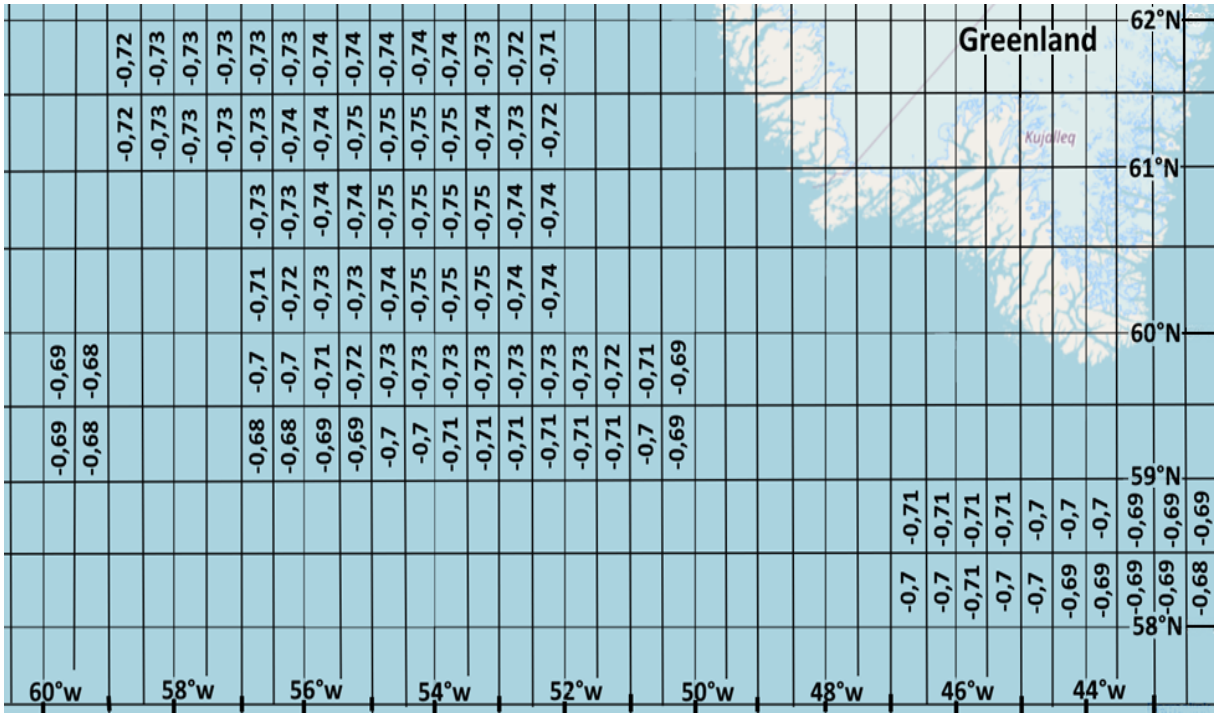


Рис. 9 – Максимальні за рік значущі коефіцієнти кореляції між рядом річного приросту аномалій і середньомісячними значеннями SAT на квадратах 0,5×0,5°

Fig. 9 – The maximum annual significant correlation coefficients between the series of annual growth of anomalies and average monthly SAT values on 0.5×0.5° squares

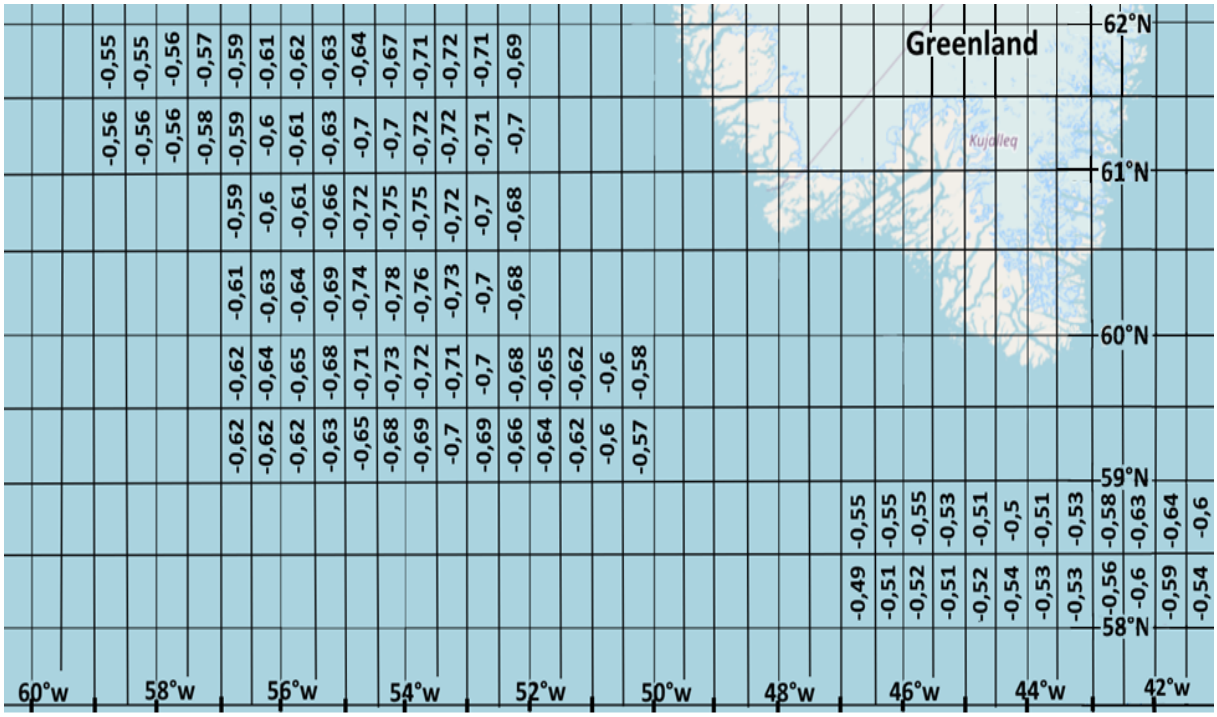


Рис. 10 – Максимальні за рік значущі коефіцієнти кореляції між рядом річного приросту аномалій і середньомісячними значеннями SST на квадратах 0,5×0,5°

Fig. 10 – Maximum annual significant correlation coefficients between the series of annual growth of anomalies and average monthly SST values in 0.5×0.5° squares

Таблиця 3 – Максимальні значення значущих коефіцієнтів кореляції ряду річного приросту аномалій на 15 квітня з середньомісячними SST на протязі року

Table 3 – Maximum values of significant correlation coefficients of the series of annual growth of anomalies on April 15 with average monthly SST throughout the year

Межі району	Розмір квадратів	Межі/значення максимальних коефіцієнтів кореляції			
		Грудень	Січень	Лютий	Березень
№1 50 – 60° N 40 – 50° W	5×5°	-0,55	-0,61		
	2,5×2,5°	-0,54	-0,62		-0,52
	1×1°	-0,53 – -0,55	-0,58 – -0,62	-0,52	-0,54 – -0,56
	0,5×0,5°	-0,51 – -0,55	-0,6 – -0,64		
	Точки	-0.53 – -0.57	-0,6 – -0,65	-0.51	
№2 50 – 60° N 50 – 60° W, виключаючи сушу	5×5°	-0,52			-0,54
	2,5×2,5°	-0,54 – -0,55		0,52	-0,61 – -0,65
	1×1°	-0,54 – -0,58	-0,51	-0,61 – -0,64	-0,69 – -0,72
	0,5×0,5°	-0,55 – -0,59	-0,51	-0,6 – 0,64	-0,69 – -0,73
	Точки	-0,55 – -0,6	-0,5 – -0,55	-0,59 – -0,64	-0,7 – -0,76
№3 60 – 70° N 50 – 60° W, виключаючи сушу	5×5°				-0,63
	2,5×2,5°	-0,64		-0,62	-0,76
	1×1°	-0,51 – -0,53		-0,57 – -0,63	-0,7 – -0,76
	0,5×0,5°	-0,51 – -0,54	-0,52	-0,59 – -0,64	-0,7 – -0,78
	Точки	-0,5 – -0,55	-0,5 – -0,53	-0,6 – 0,64	-0,7 – -0,77

Таблиця 4 – Максимальні значення значущих коефіцієнтів кореляції ряду річного приросту аномалій на 15 квітня з середньомісячними SAT на протязі року

Table 4 – Maximum values of significant correlation coefficients of the series of annual growth of anomalies on April 15 with average monthly SAT throughout the year

Межі району	Розмір квадратів	Межі/значення максимальних коефіцієнтів кореляції			
		Грудень	Січень	Лютий	Березень
№1 50 – 60° N 40 – 50° W	5×5°	-0,66 – -0,68			-0,58
	2,5×2,5°	-0,68 – -0,7			-0,64
	1×1°	-0,67 – -0,71			-0,6 – -0,66
	0,5×0,5°	-0,69 – -0,71			-0,55 – -0,6
	Точки	-0.68 – -0.71			-0.58 – -0.61
№2 50 – 60° N 50 – 60° W, виключаючи сушу	5×5°	-0,67			-0,62
	2,5×2,5°	-0,65 – -0,69			-0,65 – -0,68
	1×1°	-0,65 – -0,69			-0,68 – -0,72
	0,5×0,5°	-0,68 – -0,69		-0,5	-0,69 – -0,73
	Точки	-0,68 – -0,69		-0,5 – -0,51	-0,69 – -0,74
№3 60 – 70° N 50 – 60° W, виключаючи сушу	5×5°	-0,63		-0,52	-0,72
	2,5×2,5°	-0,61 – -0,67		-0,5 – -0,51	-0,69 – -0,74
	1×1°	-0,63 – -0,68	-0,5	-0,5 – -0,51	-0,7 – -0,75
	0,5×0,5°	-0,64 – -0,68	-0,5	-0,5 – -0,51	-0,72 – -0,75
	Точки	-0,64 – -0,69	-0,5	-0,5 – -0,51	-0,71 – -0,75

Розповсюдження льодового покриву в протоці Дейвіса та морі Лабрадор має досить різноманітний характер з року в рік, але, тим не менш, можливо об'єднати деякі роки за різними спільними ознаками. По-перше, це класифікація за розповсюдженням крижаного покриву відносно середньої межі. Згідно цього розглянемо три групи: розповсюдження більше за середнє (рис. 1), розповсюдження менше за середнє (рис. 11б, 11в) і розповсюдження близько до середнього (рис. 11а). До першої групи відносяться 1980, 1982 – 1985, 1987, 1989 – 1995, 1997, 2003, 2008 – 2009 і 2014 – 2017 роки, що складає 47% випадків за період. До другої – 1979, 1981, 1986, 1988, 1996, 1998 – 2001, 2004 – 2007, 2010, 2011, 2013, 2018 – 2023 роки, або 49% випадків. Хоча в якості точки відліку ми беремо середнє за 1981 – 2010 роки, але і за наш, значно більший розглядуваний період, кількість членів обох груп майже однакова. Третя група найменша. В першому наближенні туди можна віднести 2002 і 2012 роки, або 4% випадків.

По-друге, середню межу вздовж меридіану можна поділити приблизно на три однакові відрізки: 65° – 60°, 60° – 55° і 55° – 50° N, та на них розглядати розташування льодового поля відносно межі. На першому відрізку розповсюдження криги, більше за середнє, спостерігалося у 1981 – 1985, 1987, 1989 – 1991, 1993 – 1995, 2009, 2012, 2014, 2015, 2017 і 2022 роках (у 11 випадках – значне), що складає 40% випадків за період (рис. 1). Менше за середнє було у 1979, 1980, 1986, 1988, 1996, 1998 – 2001, 2003 – 2007, 2010, 2011, 2013, 2016, 2018 – 2021 і 2023 роках (у 7 випадках – значне), або у 51% випадків (рис. 11б, 11в). У цьому районі перші 17 років (1979 – 1995 рр.) значно переважала додатна аномалія – 12 випадків, лише одного разу – середнє розповсюдження, і 4 рази спостерігалася від'ємна. Наступні 13 років (1996 – 2008 рр.) її не було зовсім, а останні 15 років (2009 – 2023 рр.) трохи переважала від'ємна (8 проти 6). Розповсюдження близько до середнього спостерігалося у 1992, 1997, 2002 і 2008 роках, або у 9% випадків (рис. 11а).

На другому відрізку розповсюдження криги, більше за середнє, спостерігалося у 1980, 1983, 1984, 1987 – 1991, 1993 – 1995, 2009, 2012, 2014 – 2017 роках (у 7 випадках – значне), що складає 38% випадків за період (рис. 1). Менше за середнє було у 1979, 1981, 1996 – 1999, 2003 – 2006, 2008, 2010, 2011, 2013, 2018 – 2021 і 2023 роках (у 2 випадках – значне), або у 42% випадків (рис. 11б, 11в). Розповсюдження близько до середнього спостерігалося у 1982, 1985, 1986, 1992, 2000 – 2002, 2007 і 2022 роках, або у 20% випадків (рис. 11а). Тут у перші 17

років (1979 – 1995 рр.) переважала додатна аномалія – 11 випадків, досить часто було середнє розповсюдження криги – у 4 випадках, і лише 2 рази спостерігалася від'ємна. Наступні 13 років (1996 – 2008 рр.) додатної аномалії не було зовсім, а останні 15 років (2009 – 2023 рр.) трохи переважала від'ємна аномалія (8 проти 6).

Як бачимо, розповсюдження криги на першому і другому відрізках майже аналогічне одне одному. Коли більш детально порівняти ці два відрізки, то можна помітити, що на першому значних відхилень (як додатних, так і від'ємних) було у два рази більше, ніж на другому. Також, на другому відрізку за 45 років спостерігалося лише два випадки значних від'ємних аномалій (2004, 2006 рр.) (рис. 11б).

На третьому відрізку розповсюдження криги, більше за середнє, спостерігалося у 1980, 1982 – 1985, 1989 – 1994, 1998, 2003, 2008, 2009, 2014 – 2017 роках (у 15 випадках – значне), що складає 42% випадків за період (рис. 1). Менше за середнє було у 1979, 1981, 1986 – 1988, 1995 – 1997, 1999, 2000, 2001, 2004 – 2007, 2010 – 2013, 2019 – 2023 роках (у 15 випадках – значне), або у 53% випадків (рис. 11б). Розповсюдження близьке до середнього спостерігалося у 2002 і 2018 роках, або у 5% випадків (рис. 11а). Таким чином, третій відрізок виявився чемпіоном по кількості значних аномалій. Крім того, на цій ділянці середньої межі в одному місці могла бути досить велика додатна аномалія, у другому – від'ємна, а при складанні розподіл міг опинитися близьким до середнього (рис. 11а). Якщо на інших відрізках спостерігалися значні аномалії, то вони були тільки одного знаку.

Також, часом біля острова Ньюфаундленд з'являється великий крижаний «язик», спрямований частіше на південний схід або на схід (рис. 1). Він спостерігався у 1985, 1989 – 1995, 2003, 2008, 2009, 2014 – 2016 роках, що складає 31% випадків за період, а його широтне положення могло дещо змінюватись з року в рік.

По-третє, можна розглядати крижане поле за наявністю або відсутністю льоду в Дейвісовій протоці вздовж південно-західного узбережжя Гренландії, від мису Фарвел до місця примикання середньої межі. Тут теж можна виділити три групи: коли криги немає (рис. 11а),

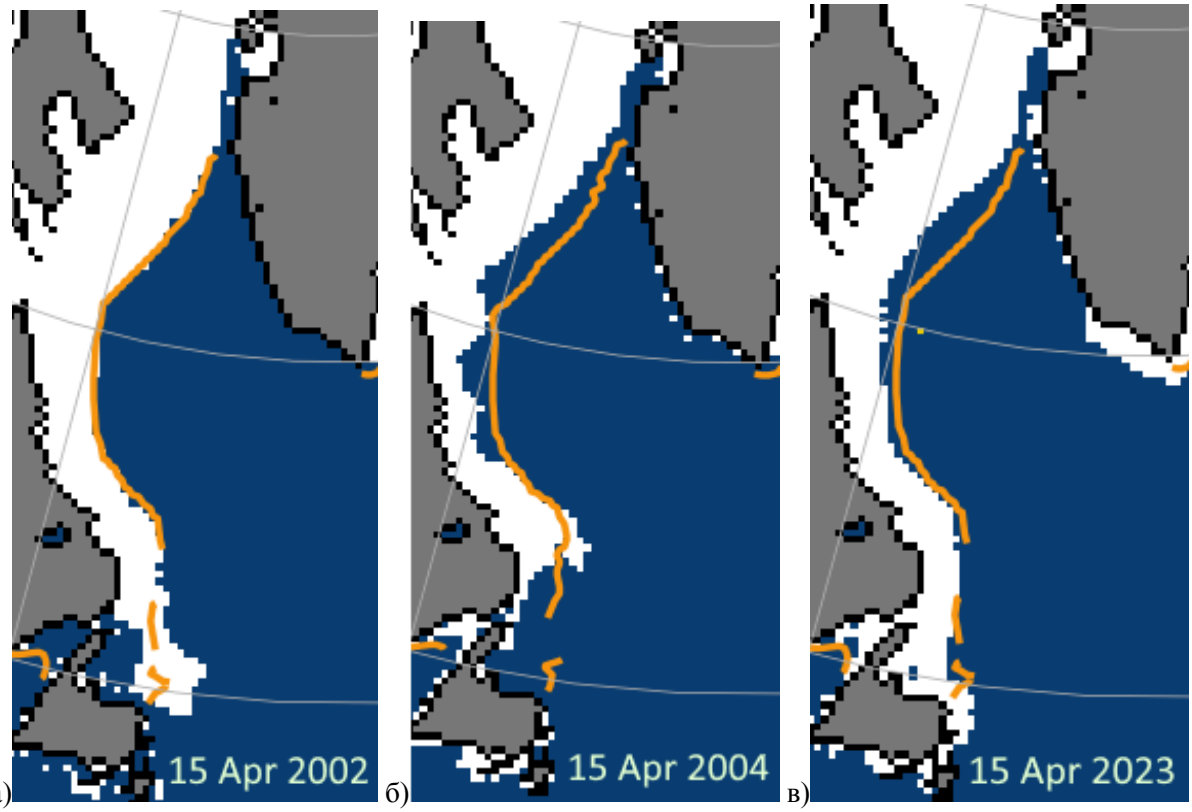


Рис. 11 – Розповсюдження морської криги в протоці Дейвіса та морі Лабрадор на 15 квітня 2002 (а), 2004 (б) і 2023 (в) роки [18]

Fig. 11 – Distribution of sea ice in Davis Strait and the Labrador Sea on April 15, 2002 (a), 2004 (b) and 2023 (c) [18]

коли криги дуже мало (рис. 1, 11б) і коли крига присутня (рис. 11в). Зрозуміло, що перша група буде найменшою, туди входять лише 2002, 2011, 2014 і 2017 роки, що складає 9% випадків за період. Друга група значно більша: 1986, 1988 – 1994, 1997, 1998, 2003 – 2007, 2010, 2013, 2015, 2016, 2018 – 2021 роки, або 51% випадків. Вісімнадцять років, що залишилися (40% випадків), відносяться до третьої групи. Тобто, більшу частину досліджуваного періоду (27 випадків проти 18) вздовж південно-західного узбережжя Гренландії льоду або було дуже мало, або він був взагалі відсутнім.

Таким чином, зрозуміло, що розповсюдження льодового покриву у досліджуваному районі можна розглядати, як ряд типових ситуацій. Кожна з них має свої індивідуальні особливості викликані багатьма факторами, наприклад, пануючими вітрами, температурою води і повітря, течіями, тощо. Виявлення і вплив цих факторів на крижане поле потребує подальшого поглибленого вивчення.

4 ВИСНОВКИ

В міжрічній мінливості льодового покриву в Дейвісовій протоці та морі Лабрадор за період 1979-2023 рр. спостерігається суттєвий статистично значущий від'ємний тренд, а також присутні циклічні коливання з періодами 3-6,9, 10 і 13 років.

У виконаній роботі знайдено кілька районів / точок у Північній Атлантиці, де показники температур приземного повітря і поверхневої води у грудні та березні суттєво впливають на розповсюдження льодового покриву на 15 квітня в Дейвісовій протоці та морі Лабрадор.

Найбільш стабільним за досліджуваний період виявилось розповсюдження криги між 60° – 55° північної широти, де воно найчастіше було близьким до середнього та мало найменше значних аномалій. Самим нестабільним льодовий покрив виявився на ділянці нижче 55° північної широти, де кількість значних аномалій максимальна, крім того одночасно можуть спостерігатись досить великі додатні і від'ємні аномалії і час від часу з'являються чималі крижані «язики». Вздовж південно-західного узбережжя Гренландії більшу частину періоду з 1979 по 2023 рік льоду або було дуже мало, або він був взагалі відсутнім.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Divergent consensuses on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather / Cohen J. et al. *Nature Climate Change*. 2020. 10. Pp. 20-29. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y
2. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for policymakers / The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. URL: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/ (Accessed: 20.08.2023)
3. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records / Lavergne T. et al. *Cryosphere*. 2019. 13(1). Pp. 49-78. https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019
4. Notz D. Arctic sea ice in CMIP6 / SIMIP Community. *Geophysical Research Lett*. 2020. Vol. 47 (10). https://doi.org/10.1029/2019GL086749
5. Historical Changes in the Davis Strait Baffin Bay Surface Winds and Waves, 1979–2016 / Xiaolan L. Wang et al. *Journal of Climate*. 2021. 10 (22). Pp. 8879-8896. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0054.1
6. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Chapter 3: Polar Regions / The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019. URL: https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/ (Accessed: 10.06.2023)
7. Docquier D., Koenigk T. A review of interactions between ocean heat transport and Arctic sea ice. *Environmental Research Lett*. 2021. 16 (12). https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac30be
8. The influence of declining sea ice on shipping activity in the Canadian Arctic / Pizzolato L. et al. *Geophysical Research Lett*. 2016. 43 (23). Pp. 12,146-12,154. https://doi.org/10.1002/2016GL071489
9. Compendium of Arctic Ship Accidents / Protection of the Arctic Marine Environment. Borgir, v. Nordurslod, Akureyri, Iceland, 2021. URL: https://www.pame.is/document-library/pame-reports-new/pame-ministerial-deliverables/2021-12th-arctic-council-ministerial-meeting-reykjavik-iceland/799-compendium-of-arctic-ship-accidents-casa-final-report/file (Accessed: 12.06.2023)
10. Sea ice – ocean interactions in the Barents Sea modeled at different resolutions / Docquier D. et al. *Front. Earth Sci*. 2020. 8. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00172
11. Volume, Freshwater, and Heat Fluxes through Davis Strait, 2004–05 / Curry B. et al. *J. Phys. Oceanogr*. 2011. 41 (3). Pp. 429-436. https://doi.org/10.1175/2010JPO4536.1
12. Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations / Sandø A. B. et al. *J. Geophys. Res. Ocean*. 2014. 119 (3). Pp. 2095-2108. https://doi.org/10.1002/2013JC009435
13. Dynamics of the sea ice edge in Davis Strait / Heide-Jørgensen M. P. et al. *Journal of Marine Systems*. 2007. 67(1-2). Pp. 170-178. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.10.011
14. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system / Smedsrud L. H. et al. *Reviews of Geophys*. 2013. 51 (3). Pp. 415-449. https://doi.org/10.1002/rog.20017
15. Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles – variability and change / Semenov V. A. et al. *Cryosphere*. 2015. 9. Pp. 1077-1131. https://doi.org/10.5194/tcd-9-1077-2015

16. Changes in Sea Surface Temperature and Sea Ice Concentration in the Arctic Ocean over the Past Two Decades / Meng Yang et al. *Remote Sensing*. 2023. 15 (4). https://doi.org/10.3390/rs15041095
17. Arctic sea ice variation in the Northwest Passage in 1979–2017 and its response to surface thermodynamics factors / Xin-Yi Shen et al. *Advances in Climate Change Research*. 2021. 12 (4). Pp. 563-580. https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.08.004
18. National Snow and Ice Data Center. URL: https://masie_web.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/NOAA/G02135/north/daily/images/ (Accessed: 12.03.2023)
19. Admiralty sailing direction. Arctic Pilot. Vol. III. NP 12. Eight Edition / The United Kingdom Hydrographic Office, 2007. 566 p.
20. Admiralty sailing direction. Newfoundland and Labrador Pilot. NP 50. Eleventh Edition. / The United Kingdom Hydrographic Office, 2003. 588 p.
21. Climate Reanalyzer. URL: https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/ (Accessed: 10.03.2023)
22. Абузяров З. К., Думанская И. О., Нестеров Е. С. Оперативное океанографическое обслуживание. Обнинск: «ИГ-СОЦИН», 2009. 287 с.

REFERENCES

1. Cohen, J. et al. (2020). Divergent consensuses on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. *Nature Climate Change*, 10, pp. 20-29. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y
2. The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for policymakers*. Available at: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/ (Accessed: 20.08.2023)
3. Lavergne T. et al. (2019). Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records. *Cryosphere*, 13, pp. 49-78. https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019
4. Notz, D. & SIMIP Community. (2020). Arctic sea ice in CMIP6. *Geophysical Research Let*., 47 (10). https://doi.org/10.1029/2019GL086749
5. Xiaolan, L. Wang et al. (2021). Historical Changes in the Davis Strait Baffin Bay Surface Winds and Waves, 1979–2016. *Journal of Climate*, 10 (22), pp. 8879-8896. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0054.1
6. The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Chapter 3: Polar Regions*. Available at: https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/ (Accessed: 10.06.2023).
7. Docquier, D. & Koenigk, T. (2021). A review of interactions between ocean heat transport and Arctic sea ice. *Environmental Research Lett*., 16 (12). https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac30be
8. Pizzolato, L. et al. (2016). The influence of declining sea ice on shipping activity in the Canadian Arctic. *Geophysical Research Lett*., 43 (23), pp. 12,146-12,154. https://doi.org/10.1002/2016GL071489
9. Protection of the Arctic Marine Environment. (2021). *Compendium of Arctic Ship Accidents*. Borgir, v. Nordurslod, Akureyri, Iceland. Available at: https://www.pame.is/document-library/pame-reports-new/pame-ministerial-deliverables/2021-12th-arctic-council-ministerial-meeting-reykjavik-iceland/799-compendium-of-arctic-ship-accidents-casa-final-report/file (Accessed: 12.06.2023)
10. Docquier, D. et al. (2020). Sea ice – ocean interactions in the Barents Sea modeled at different resolutions. *Front. Earth Sci*. 8. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00172
11. Curry, B. et al. (2011). Volume, Freshwater, and Heat Fluxes through Davis Strait, 2004–05. *J. Phys. Oceanogr*., 41 (3), pp. 429-436. https://doi.org/10.1175/2010JPO4536.1
12. Sandø, A.B. et al. (2014). Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations. *J. Geophys. Res. Ocean*., 119 (3), pp. 2095-2108. https://doi.org/10.1002/2013JC009435
13. Heide-Jørgensen, M.P. et al. (2007). Dynamics of the sea ice edge in Davis Strait. *Journal of Marine Systems*, 67(1-2), pp. 170-178. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.10.011
14. Smedsrud, L.H. et al. (2013). The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophys*., 51 (3), pp. 415-449. https://doi.org/10.1002/rog.20017
15. Semenov, V.A. et al. (2015). Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles – variability and change. *Cryosphere*, 9, pp. 1077-1131. https://doi.org/,10.5194/tcd-9-1077-2015
16. Meng Yang et al. (2023). Changes in Sea Surface Temperature and Sea Ice Concentration in the Arctic Ocean over the Past Two Decades. *Remote Sensing*, 15(4). https://doi.org/10.3390/rs15041095
17. Xin-Yi Shen et al. (2021). Arctic sea ice variation in the Northwest Passage in 1979–2017 and its response to surface thermodynamics factors. *Advances in Climate Change Research*, 12 (4), pp. 563-580. https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.08.004
18. *National Snow and Ice Data Center*. URL: https://masie_web.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/NOAA/G02135/north/daily/images/ (Accessed: 12.03.2023)
19. The United Kingdom Hydrographic Office (2007). *Admiralty sailing direction. Arctic Pilot*, vol. III, NP 12.
20. The United Kingdom Hydrographic Office (2003). *Admiralty sailing direction. Newfoundland and Labrador Pilot*, NP 50.
21. *Climate Reanalyzer*. Available at: https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/ (Accessed: 10.03.2023)
22. Abuzyarov, Z., Dumanskaya, I. & Nesterov, E. (2009). *Operativnoye okeanograficheskoye obsluzhivaniye [Operational oceanographic service]*. Obninsk: «IG-SOTCIN» Publ. (in Russ).

INTERANNUAL VARIABILITY OF ICE COVER ACROSS DAVIS STRAIT AND THE LABRADOR SEA FOR THE PERIOD FROM 1979 TO 2023

E. Maliuha[1], R. Gavriluk[2]

[1]*National University «Odessa Maritime Academy»,*
Didrihsona St., 8, 65000, Odesa, Ukraine, eduard241965@gmail.com
http://orcid.org/0009-0005-0039-9837
[2]*Odessa State Environmental University,*
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, RAIISAGAVR@gmail.com
http://orcid.org/0009-0002-9129-3293

In conditions of rapid development of trade and transport communications, the issue of navigation through ice regime zones became of greater importance. In particular, reduction of the area of ice cover in the Canadian Arctic because of global warming opens up favourable prospects for further development of maritime shipping in this zone. Considering that the routes through the Northwest Passage are the shortest ones of all the routes connecting the Atlantic and Pacific oceans, it is clear that all aspects of this topic are of great importance and relevance. This especially applies to the aspects dedicated to studying the characteristics of appearance, formation, concentration, physical characteristics, trajectory of ice movement and forecasting the area of the ice cover in a given zone, i.e. the characteristics affecting the conditions of ice navigation and serving as determining factors in terms of navigation safety.

The research examines some of these issues, namely the spread of the ice cover during the period of its maximum formation across Davis Strait and the Labrador Sea (where the routes through the Northwest Passage start) and the establishment of statistical relations between the ice spread and the temperatures of surface water and surface air. The research method to be used: synoptic-climatic and statistical analysis of numerical series of ice cover deviations from its average limit as of April 15 over the period of 1979-2023 within the zone in study.

Based on the set goal, the study processed raw data on distribution of ice cover across Davis Strait and the Labrador Sea for the period of 1979-2023 and completed its statistical analysis. The results of the analysis showed presence of a statistically significant negative trend and cyclical fluctuations with periods of 3-6, 9, 10 and 13 years in relation to the interannual variability of ice cover distribution for the studied period. Positive trends are also observed in the interannual variability of surface water temperature and surface air temperature. After bringing the original series to a quasi-stationary form, a correlation analysis of the relationships between the ice cover distribution and the temperature of water and air was carried out. The results of the analysis determined zones and points with statistically significant correlation coefficients between them during the year. It turned out that the highest values of coefficients are observed from December to March, and the maximum one occurs in March.

Systematization and analysis of the ice field across Davis Strait and the Labrador Sea during the period of maximum development made it possible to establish that the spread of ice between 60° and 55° north parallels was the most stable during the studied period, and the least stable was observed in the area below 55° north parallel.

The results of the conducted research open up prospects for development of methods for forecasting the distribution of ice cover across Davis Strait and the Labrador Sea. This will make ice navigation in this area safer.

Keywords: ice cover; Davis Strait; the Labrador Sea; Northwest Passage; spread of ice

Подання до редакції **: 16. 10. 2023**
Надходження остаточної версії **: 07. 12. 2023**
Публікація статті : **21. 12. 2023**

Ukrainian hydrometeorological journal, 2023, 32, 95-114 doi: 10.31481/uhmj.32.2023.07
ISSN 2311-0902 (print), 2616-7271 (online)

УДК 551.468.4

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ В ЧОРНОМУ МОРІ РОЗПРІСНЕНИХ І ЗАБРУДНЕНИХ ПЕРЕХІДНИХ ВОД З ДНІПРОВСЬКО-БУЗЬКОГО ЛИМАНУ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Ю. С. Тучковенко[1,2], Д. В. Кушнір[1], В. А. Овчарук[1], А. В. Соколов[3] , В. М. Коморін[4]

[1]*Одеський державний екологічний університет,*
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
sience@odeku.edu.ua, https://orcid.org/0000-0003-3275-9065
[2]*Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine,*
37 Pushkinska Str., Odesa, 65048, Ukraine.
[3]*Національний центр управління та випробувань космічних засобів,*
Україна, mriya1space@gmail.com
[4]*НДУ «Український науковий центр екології моря»,*
Французький булв.89, 65009, Одеса, Україна, vkomorin@gmail.com

В роботі досліджено особливості розповсюдження в північно-західній частині Чорного моря (ПнЗЧМ) великих обсягів розпріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману, які надійшли до нього в результаті руйнування греблі Каховської ГЕС у червні 2023 р. За період з 06.06.2023 до 12.06.2023 з Каховського водосховища до Дніпровсько-Бузького лиману, а потім до моря надійшло 14,4 км^3 води, що становить 27 % від загального об'єму середнього річного природного стоку Дніпра (53,5 км^3). В перші дні після руйнування греблі витрати води через отвір в ній дорівнювали 40-50 тис. м^3/с. З цими водами до моря надійшло багато різнотипних забруднювальних речовин, які містились у водах Каховського водосховища, донних відкладах, були змиті із затоплених територій пониззя Дніпра (більше 2000 га).

Аналіз особливостей розповсюдження було здійснено із використанням супутникових знімків кольору поверхні моря, концентрації хлорофілу-а, а також результатів гідродинамічного моделювання із використанням 3-D варіанта чисельної гідродинамічної моделі Delft3D-Flow Flexible Mesh. Встановлено, що шлейф розпріснених і забруднених вод спочатку розповсюджувався в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі ПнЗЧМ у напрямку узбережжя міста Одеса, якого він досяг 9-10 червня 2023 р. Потім шлейф почав поширюватись уздовж західного узбережжя і 14 червня 2023 року досяг району розташування Тузлівських лиманів. У подальшому відбувалося розмивання витягнутого уздовж узбережжя відносно вузького шлейфу розпріснених вод у бік відкритого моря у вигляді «язиків», які утворилися в районах піднять морського дна. Моделювання розповсюдження консервативної домішки нейтральної плавучості як трасера розповсюдження забруднення з перехідними водами з Дніпровсько-Бузького лиману показало, що тільки за рахунок гідродинамічного розведення відбувається зменшення рівня забруднення до 60 % (від рівня забруднення річкових вод в районі міста Херсон) в Одеському районі ПнЗЧМ та до 30 % - в акваторії Дунай-Дністровського межиріччя.

Вказані особливості визначалися циркуляцією вод, яка в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі моря в перші дні формувалась під впливом значних градієнтів рівня моря, викликаних надходженням великих обсягів опріснених перехідних вод через лиман і Кінбурнську протоку, а потім густинними течіями сформованими на гідрофронті між трансформованими річковими водами і оточуючими морськими. Вплив вітрових умов проявлявся у характері поширення на акваторії ПнЗЧМ шлейфу розпріснених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману, положенні і конфігурації гідрофронту. Вітрові течії хоча і не були домінуючими, але впливали на динаміку вод і розподіл концентрацій домішки, наприклад хлорофілу-а, в межах шлейфу розпріснення, оконтуреного гідрофронтом, сприяли проникненню трансформованих річкових вод у бік Одеси уздовж прибережного мілководдя.

Ключові слова: руйнування греблі; Каховське водосховище; Чорне море; північно-західна частина; розповсюдження перехідних вод; супутникові дані; моделювання.

1 ВСТУП

Чорне море – є унікальною водоймою, яка характеризується високим вмістом сірководню (біля 87% свого об'єму) та обмеженим кисневим шаром поверхневих вод, який є придатним для існування аеробних організмів. Останніми десятиліттями спостерігається зменшення товщини цього шару в центральних районах Чорного моря до 60 метрів [1]. Безумовно процеси, що проходять в глибоководній зоні моря та на шельфі, взаємопов'язані. Збереження стійкості морських екосистем є предметом занепокоєння в контексті дії потужних зовнішніх факторів впливу, як антропогенного, так і природного походження [2].

Акт екоциду, здійснений російською федерацією через підрив дамби Каховської ГЕС 6 червня 2023 року, класифікується як наймасштабніша антропогенна катастрофа в Європі за останні три десятиріччя і має значний вплив на природне середовище, включно з Чорним морем [3].

Навіть у мирний час, антропогенні виклики Чорного моря найбільш виражені в прибережних та шельфових зонах, де зосереджено економічну діяльність та знаходиться більшість морських джерел забруднення. Проте руйнівний вплив воєнних дій може значно погіршити ці проблеми.

У світлі зростаючого антропогенного навантаження, змін клімату та природних катаклізмів, одним із пріоритетних напрямків дослідження морських екосистем стає математичне моделювання, яке спрямоване на розв'язання завдань оцінювання, діагностування та прогнозування екосистемних ризиків моря [4].

Екологічний стан та якість морських вод в Дунай-Дніпровському межиріччі повністю визначаються характеристиками стоку річок Дунай (Кілійське гирло), Дністер, Дніпро та Південний Буг, які впадають в український сектор північно-західної частини Чорного моря (ПнЗЧМ). Річковий стік є головним джерелом антропогенного забруднення цієї частини Чорного моря [5, 6]. Під його впливом розвиваються такі негативні екосистемні процеси як «цвітіння» води влітку в результаті спалахів розвитку фітопланктону, включно з токсичними для гідробіонтів ціанобактеріями, систематичний розвиток гіпоксійних і аноксійних зон в придонному шарі акваторії, які призводять до загибелі морських біоресурсів. Північна частина ПнЗЧМ знаходиться під домінуючим впливом стоку Дніпра (середній річний об'єм стоку близько 53,5 км^3/рік, середньорічна витрата 1700 м^3/с) і, меншою мірою, Південного Бугу (3,4 км^3/рік, 108 м^3/с), які надходять до моря з Дніпровсько-Бузького лиману. У зв'язку з цим, цей район отримав назву Дніпровсько-Бузького пригирлового.

Особливості розповсюдження перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману на акваторії ПнЗЧМ описані, зокрема, в роботі [7]. При виході з Дніпровсько-Бузького лиману річкові води розтікаються тонким шаром по поверхні моря у вигляді плюму (шлейфу), який, залежно від вітру, може бути орієнтований у двох напрямках. У першому варіанті, при домінуванні північних та північно-західних вітрів, вісь шлейфу спрямована на південний захід і опріснення морських вод у берегів Одеси не відбувається. Солоність вод в Одеському районі ПнЗЧМ в цьому випадку знаходиться у звичайних межах 14-16 ‰. У другому варіанті розтікання, що досить часто спостерігається, річковий плюм розпрісненої води простягається на захід над Одеською банкою і уздовж північного узбережжя ПнЗЧМ, досягаючи берегів Одеси і значно знижуючи солоність вод в поверхневому шарі. Як правило, цей випадок має місце у квітні – травні в період весняного водопілля на Дніпрі і Південному Бузі або під час літніх дощових паводків, за сильних південно-східних та східних вітрів, коли за даними гідрометстанції Одеса-порт солоність знижується до 10 - 12 ‰, а у виняткових випадках і до 2 ‰ [8]. Окрім зазначених варіантів, річкові води при виході з лиману можуть розтікатися віялоподібно. У таких випадках потік від Кінбурнської протоки розходиться по поверхні моря радіально і досить швидко згасає, перехідні лиманні води за солоністю швидко трансформуються в морські. Довжина зони трансформації річкових вод не перевищує двох десятків кілометрів, і солоність води в Одеському регіоні ПнЗЧМ не знижується [9].

Як правило, з річковими водами на акваторію Дніпровсько-Бузької пригирлової ділянки ПнЗЧМ надходить значна кількість біогенних та органічних речовин. Тому проникнення шлейфу трансформованих річкових вод до Одеського району сприяє зростанню продукції і біомаси фітопланктону та зростанню ролі прісноводних видів у її створенні. Зазвичай області шлейфу відносно опріснених перехідних вод

відповідають високим концентраціям хлорофілу-а та біомаси фітопланктону.

Каховське водосховище було крайньою нижньою сходинкою каскаду Дніпровських водосховищ, якими повністю зарегульований природний стік Дніпра. Будівництво Каховського гідровузла розпочалося у вересні 1950 р., в 1955 році відбувся пуск першого гідроагрегату, а в жовтні 1956 р. був введений в експлуатацію останній, шостий гідроагрегат Каховської гідроелектростанції (ГЕС). В результаті будівництва сформувалося Каховське водосховище (рис.1), яке забезпечувало станцію водою, та з'явилось місто Нова Каховка [10].

Офіційною метою створення водосховища було забезпечення високих і стійких врожаїв сільськогосподарських культур у південних посушливих районах України та північних районах Криму, але дійсною метою створення великої водойми на півдні України було впровадження практики вирощування хлопку [11] та розвиток хлопкової промисловості з центром у Херсоні. Однак цим планам не судилося здійснитись, зокрема, через недостатню кількість сонячної радіації. В 2006 році в пресі [12] з'явились дані, що ще під час будівництва каскад Дніпровських водосховищ розглядався і у військовому аспекті – як водний бар'єр на випадок військового конфлікту. Дійсно, у наш час, в ході агресії російської федерації проти України, Нижній Дніпро і Каховське водосховище стали потужним водним бар'єром на шляху просування агресора в південно-західні області України.

До руйнації греблі Каховське водосховище здійснювало сезонне регулювання стоку і було найбільшим за об'ємом серед Дніпровського каскаду. Основні характеристики водосховища представлені в таблиці 1.

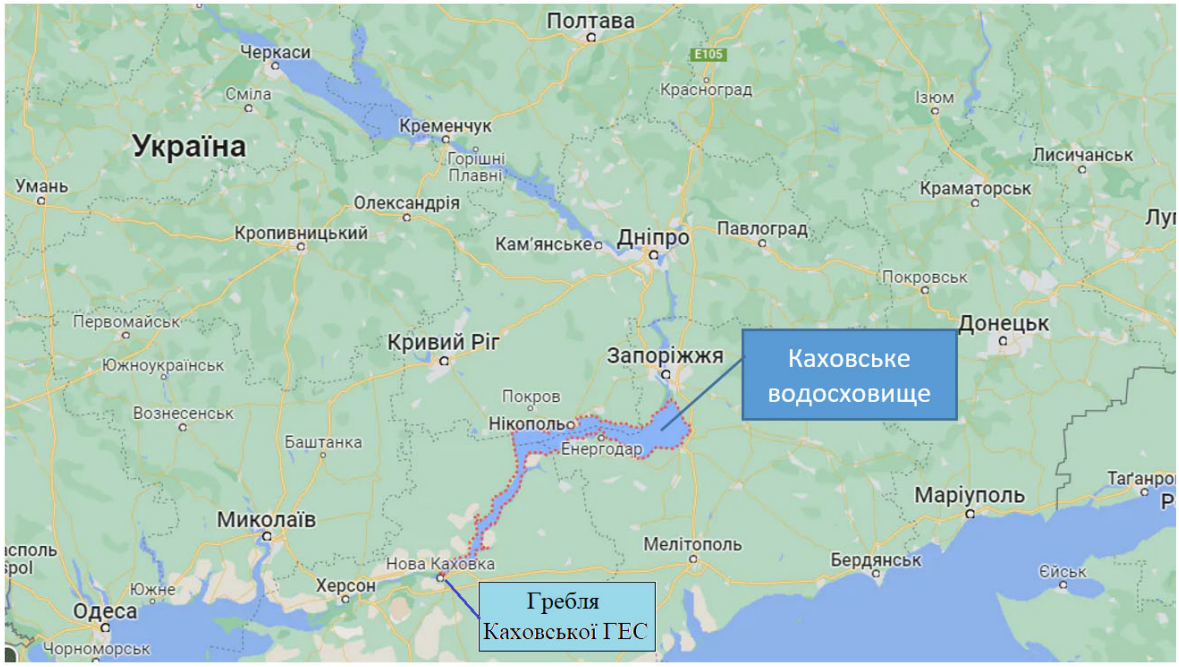


Рис. 1 – Фізико-географічне положення Каховського водосховища та греблі Каховської ГЕС
Fig. 1 – Map of location of the Kakhovka Reservoir and the Kakhovka HPP dam

Таблиця 1- Морфометричні характеристики Каховського водосховища [13]
Table 1 - Morphometric characteristics of the Kakhovka Reservoir [13]

Нормальний підпертий рівень (НПР), м	Рівень мертвого об'єму, (РМО), м	Форсований підпертий рівень (ФПР), м	Площа при НПР, км^2	Об'єм при НПР, км^3	Середня ширина, км	Середня глибина, м	Площа водозбору, тис.км^2
16,0	12,7	18,0	2155	18,18	9,3	8,5	482

Рис. 2 – Гребля Каховської ГЕС до (а), в момент прориву (б) та після (в) її руйнування
Fig. 2 – The dam of the Kakhovka HPP before (a), at the time of breakthrough (b) and after (c) its destruction

На Каховському водосховищі були розміщені водозабори великих комплексних каналів, які складали Каховський водогосподарський комплекс: Дніпро – Кривий Ріг, Верхнє-Рогачинський, Каховський, Північно-Кримський. Загальна витрата водозаборів цих каналів досягала 900 м^3/с. Після корегування планових завдань Каховське водосховище використовувалось в цілях гідроенергетики, водозабезпечення, зрошення, рибальства та судноплавства. Тим не менш, увесь час його функціонування існували дві протилежні точки зору щодо Каховського гідровузла і всього Дніпровського каскаду. Одні віддавали перевагу природному і саморегульованому стану екосистеми Дніпра, інші – потенційним можливостям каскаду водосховищ, не зважаючи на необхідність їх постійної реконструкції, витрачання значних фінансових ресурсів, негативний вплив на навколишнє природне середовище [11].

6 червня 2023 року близько 2:50 ночі (за місцевим часом UTC+3) російські окупаційні війська підірвали греблю Каховської гідроелектростанції. Крізь утворений у греблі отвір шириною близько 170 м, вода з Каховського водосховища ринула вниз за течією Дніпра затоплюючи величезні терени пониззя річки. У подальшому, через підмив стрімким потоком води вцілілих споруд греблі, отвір збільшився до 300-350 метрів (при загальній ширині греблі із затворами - 447 метрів) (рис. 2).

2 ГІДРОЛОГІЧНА СИТУАЦІЯ ПІСЛЯ ПРОРИВУ ГРЕБЛІ ВНАСЛІДОК ЇЇ РУЙНУВАННЯ

В результаті інтенсивного витоку води з резервуару Каховського водосховища через отвір у греблі, станом на 12.06.2023 р. у пониззя Дніпра надійшло 14,4 км^3 води, що становило 72 % від об'єму вод накопичених у водосховищі до моменту руйнування греблі (рис. 3.а). Для порівняння, це складає 27 % від загального об'єму середнього річного природного стоку Дніпра (53,5 км^3). За приблизними оцінками, в перші дні після руйнування греблі витрати води через отвір в ній дорівнювали 40-50 тис. м^3/с.

За даними супутникових знімків, внаслідок стрімкого витоку води з Каховського водосховища загалом було затоплено 612 км^2 території (554.6 км^2 в межах Херсонській області і 57.8 км^2 - в Миколаївський). Станом на ранок 8 червня рівень води в пониззі річки Дніпро за даними гідрологічного поста "Херсон" підвищився на 5,37 метрів (порівно з рівнем на 20 годину 5 червня) і досяг максимальної відмітки 5,68 м БС (рис. 3.б). У зоні затоплення (рис. 4) опинилися близько 80 населених пунктів в межах Херсонської та Миколаївської областей

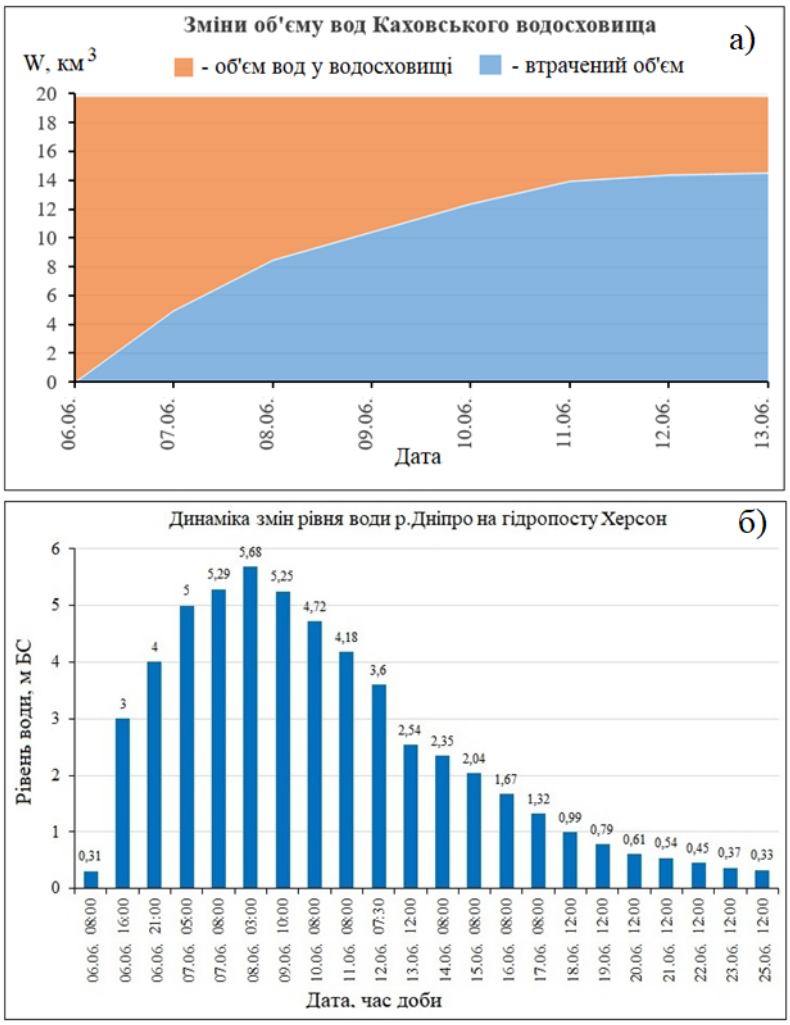


Рис. 3 – Динаміка змін об’єму вод Каховського водосховища, в км^3, (а) та рівня води на гідропосту Херсон (б)
Fig. 3 – Dynamics of changes in the water volume of the Kakhovka Reservoir, km^3, (a) and the water level at the Kherson WGS (b)

(49 та 31 населений пункт, відповідно) та близько 40 тисяч людей. Зокрема, станом на 7-8 червня були затоплені 31,5 км^2 на території міста Херсон (загальна площа міської території - 166,6 км^2), 32,8 з 56,9 км^2 території міста Олешки, 14,32 з 26,3 км^2 території міста Гола Пристань [14].

В зону затоплення потрапили промислові майданчики, близько двадцяти АЗС, декілька нафтобаз, каналізаційні насосні станції, вигрібні ями будинків приватного сектору, декілька кладовищ, скотомогильників, земельні ділянки приватних дачних садиб та сільськогосподарські угіддя (1300 га в межах Херсонської області і 750 га – в Миколаївській). З 9 червня 2023 року рівень вод у пониззі Дніпра почав поступово зменшуватись в результаті витоку води з Дніпровсько-Бузького лиману через Кінбурнську протоку до моря. Станом на 10-11 червня 2023 року загальна площа затоплених територій зменшилась майже вдвічі – до 309 км^2.

Із затоплених територій, у тому числі міст і населених пунктів, були змиті і, у кінцевому рахунку, потрапили до моря паливно-мастильні матеріали (нафтові вуглеводні), пестициди та інші небезпечні хімічні речовини - з місць їх зберігання, сполуки важких металів, включно з тими, що надходили з викидами промислових підприємств міст Запоріжжя, Дніпро і десятиліттями накопичувались у донних відкладах Каховського водосховища, рештки прісноводної рослинності та трупи загиблих свійських та диких тварин.

Метою роботи є аналіз особливостей розповсюдження в морі забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману після руйнування греблі Каховського водосховища та

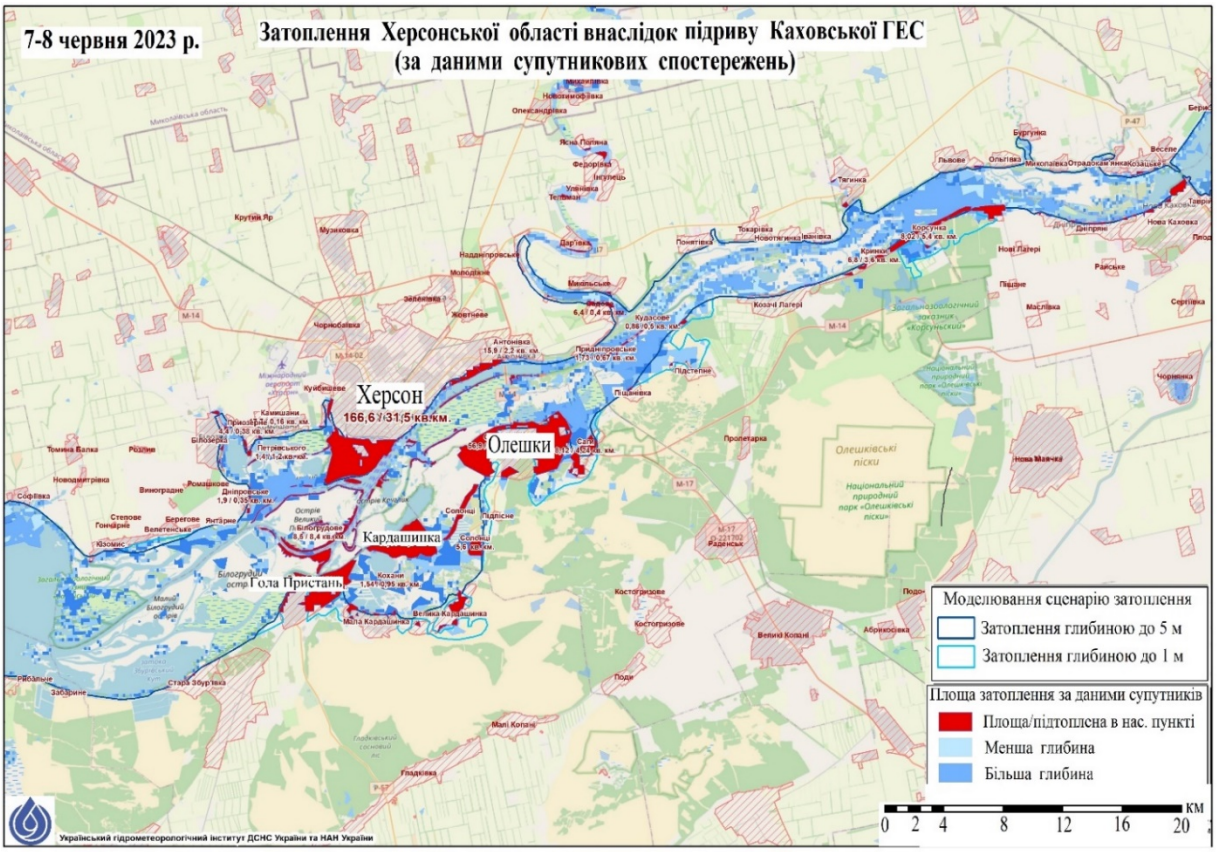


Рис. 4 – Території Херсонської області затоплені внаслідок підриву греблі Каховської ГЕС станом на 7-8 червня 2023 року [14]
Fig. 4 – The territories of the Kherson region that are flooded as a result of the explosion of the Kakhovka HPP dam on June 7-8, 2023 [14]

їхнього впливу на екологічну ситуацію в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі.

Представлена робота доповнює матеріали і висновки, основані на їх аналізі, приведені у вже опублікованих роботах [3, 15].

3 МЕТОДИ І МАТЕРІАЛИ

В роботі використані дані оброблених супутникових знімків кольору поверхні моря за даними багатоканальної зйомки радіометром MODIS з супутників Aqua, Terra, радіометром VIIRS з супутників Suomi NPP та NOAA-20 розміщених на інтернет-ресурсі [16].

Для візуалізації просторової мінливості концентрації хлорофілу-а (пігменту фітопланктону) в ПнЗЧМ використано набір даних 2 рівня OL_2_WRF, продукт CHL_NN, з космічного апарату SENTINEL-3B OLCI з повною роздільною здатністю 300 м. Концентрація хлорофілу-а розраховувалась автоматично алгоритмом нейронної мережі.

Характеристика часової динаміки окремих гідрохімічних показників екологічного стану морської води біля узбережжя м.Одеси (пляж Ланжерон) після руйнування греблі Каховської ГЕС виконувалась за даними моніторингу Державної екологічної інспекції Південно-Західного округу [17]. Модельні розрахунки розповсюдження забруднених вод, які надходили з Дніпровського-Бузького лиману після руйнування греблі, на акваторії ПнЗЧМ виконувались із застосуванням чисельної гідротермодинамічної моделі Delft3D-Flow Flexible Mesh (D-Flow FM), розробленої науково-дослідним інститутом Deltares (Делфт, Нідерланди) [18]**.** Термін «flexible mesh» у назві програмного пакету вказує на можливість застосування під час розрахунків «гнучкої» комбінації неструктурних розрахункових сіток, що можуть складатися з елементів три-, чотири-, п’яти- та шестикутної форми.

Кінцево-різницеву апроксимацію рівнянь моделі здійснено на неструктурованій розрахунковій сітці. Сітка складається зі

з'єднаних гранями вузлів (вершин), що утворюють елементарні розрахункові осередки різної форми – від трикутників до гексагонів. Скалярні величини (солоність, температура води) задаються в центрах елементарних розрахункових осередків, а нормальні компоненти швидкості течій – на їхніх відповідних гранях. Центри розрахункових осередків визначаються як центри описаних кіл, які містять вузли (вершини) розрахункового осередку. В загальному випадку, у вертикальній площині модель D-Flow FM може застосовувати криволінійну σ-систему вертикальних координат, прямолінійну Z-систему або комбінацію цих двох систем.

Під час проведення розрахунків, часовий крок розв'язання рівнянь моделі визначається моделлю динамічно на підставі критерію стабільності Куранта-Фрідріхса-Леві у межах інтервалу, який задає користувач. Для моделювання наслідків прориву дамби Каховської ГЕС була згенерована неструктурована розрахункова сітка (рис. 5а), яка складалась з 23128 вузлів (22494 розрахункових осередків). Сітка покриває всю акваторію Чорного та Азовського морів і містить область деталізації розрахунків для акваторії північно-західної частини Чорного моря (рис. 5б, в), що має криволінійну топологію та перемінний розмір розрахункових осередків. По вертикалі було задано 7 розрахункових рівнів в криволінійній σ-системі координат перемінної товщини (збільшується від поверхні до дна). Розрахунки виконувались для періоду 01.06.2023 р. – 30.06.2023 р. Початковий часовий крок розв'язання рівнянь моделі приймався рівнім 1 секунді, максимальний – 30 секундам.

На верхній (з атмосферою) відкритій границі розрахункової області задавалися з часовою дискретністю 3 години, на рівномірній 0,25°-градусній сітці перемінні у просторі поля

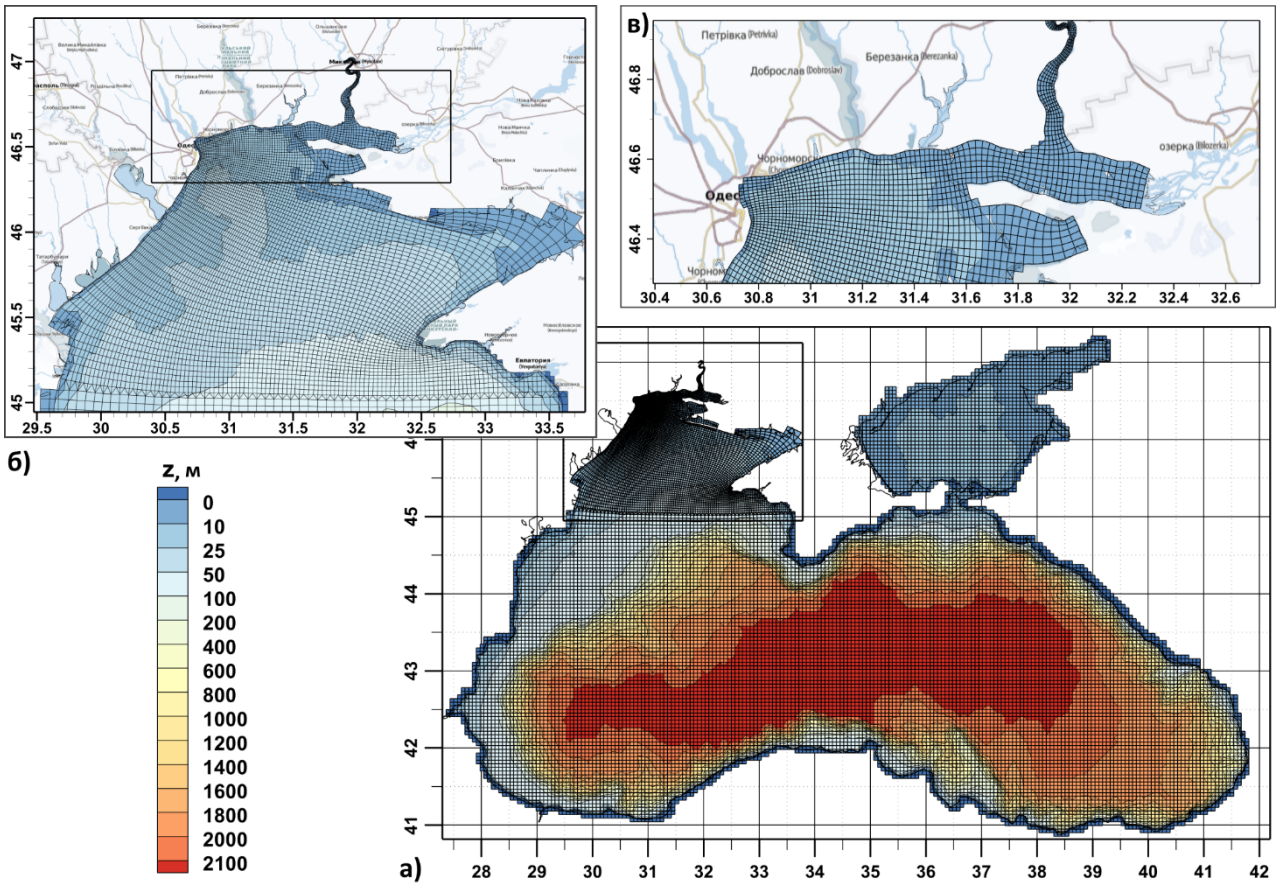


Рис. 5 – Розрахункова сітка, що використовується в моделі для Чорного моря (**а**, з глибинами), та деталізація цієї сітки для північно-західної частини Чорного моря (**б**) і Дніпровсько-Бузького пригирлового району (**в**)
Fig. 5 – The design grid used in the model for the Black Sea (**a**, with depths), and the detail of this grid for the northwestern part of the Black Sea (**b**) and the Dnipro-Bug estuarine region (**c**)

зональної та меридіональної компонент швидкості вітру, поле атмосферного тиску приведеного до середнього рівня моря, які були зчитані з архіву прогнозів глобальної моделі прогнозу погоди GFS через веб-сервіс NOMADS [19, 20].

На відкритій бічній границі моделі – у гирлі р. Дніпро, задавались коливання рівня води за даними гідропосту «Херсон» (рис. 3б). Мінливість температури річкової води задавалась на підставі інформації з гідрологічного посту «Київ» Центральної геофізичної обсерваторії. Мінералізація річкової води приймалась рівною 2 мг/дм^3.

Початковий розподіл температури і солоності морської води, рівня моря задавався у вигляді неоднорідних полів розподілу цих величин, отриманих на підставі даних реаналізу Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS) з горизонтальним кроком 1/40° [21].

Для верифікації результатів моделювання використовувались данні спостережень за мінливістю солоності води на морській гідрометеорологічній станції Одеса-порт.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Попереднє уявлення про характер розповсюдження забруднених річкових вод, які надходили до моря з Дніпровсько-Бузького лиману, можна отримати з супутникових знімків кольору поверхні моря (рис. 6). На них добре простежується динаміка розповсюдження факелу забруднених річкових вод, з високим вмістом зважених мінеральних і органічних речовин, які надходили до моря з Дніпровсько-Бузького лиману. Вже 8 червня 2023 року мешканці міста Южне, що входить до Одеської агломерації, почали спостерігати на поверхні моря велику кількість уламків дерев, плавучих островків з рогозу та іншої рослинності, побутового та будівельного сміття різних розмірів. 9 червня забруднені води з Дніпровсько-Бузького лиману досягли узбережжя м.Одеси і протягом декількох днів вся прибережна зона міста була вкрита побутовим і будівельним сміттям, рештками рослин (дерев, очерету та ін.) і тварин, мертвою рибою.

11 червня 2023 року шлейф брудної води, сформований зависсю піднятою водним потоком з дна Каховського водосховища і русла річки Дніпро, а також змитими з затоплених територій ґрунтами з високим вмістом гумусу, органічними залишками господарсько-побутового походження, загиблої флори і фауни дельтової частини р. Дніпро, досяг виходу з Дністровського лиману.

Проникненню забруднених вод з Дніпровсько-Бузького лиману уздовж північного узбережжя північно-західної частини Чорного моря в її Одеський район сприяли помірні вітри східного та північно-східного напрямків, які домінували в нічний час з 8 по 9 червня (рис. 7). В світлу пору доби вітри значно слабшали і міняли свій напрямок, що призводило до розширення зони розпріснення (шлейфу).

Для уточнення особливостей розповсюдження розпріснених вод з Дніпровсько-Бузького лиману на акваторії ПнЗЧМ було виконано математичне моделювання течій і просторово-часової мінливості солоності вод в період з 05.06.2023р. до кінця червня. На рис. 8 зображена мінливість солоності вод в районі морського торгівельного порту Одеса за результатами моделювання і даними спостережень. Видно, що модельні розрахунки задовільно узгоджуються зі спостереженими даними, що свідчить про адекватне відтворення моделлю характеру мінливості солоності вод в Одеському районі ПнЗЧМ.

Обрані результати розрахунків просторово-часової мінливості солоності вод в північно-західній частині Чорного моря і, зокрема, її Дніпровсько-Бузькому районі показані на рис. 9. Видно, що результати моделювання масштабів розповсюдження розпріснених і забруднених вод з Дніпровсько-Бузького лиману добре узгоджуються з супутниковою інформацією щодо кольору поверхні моря, наведеною на рис. 6, уточнюють і доповнюють їх додатковою інформацією. На підставі результатів модельних розрахунків можна зробити висновок, що внаслідок перенесення трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману уздовж західного узбережжя ПнЗЧМ прямий вплив руйнування греблі Каховського водосховища поширюється до пригирлової ділянки річки Дунай. Вже 14 червня 2023 року шлейф розпріснених вод досяг району розташування Тузловських лиманів. У подальшому вузький шлейф розпріснених вод, витягнутий уздовж західного узбережжя, почав розмиватися у сторону відкритого моря у вигляді «язиків», які утворилися в районах Дністровського та Дунай-Дністровського

(Тузлівського) піднять дна моря (з глибинами меншими за 20 м). Також відбувалось поширення на південь в сторону відкритого моря шлейфу розпріснених вод від Одеської банки. В третій декаді червня розпріснення вод в шлейфі почало зменшуватися і 27 червня 2023 р. в ньому вже не було вод із солоністю меншою за 10 ‰.

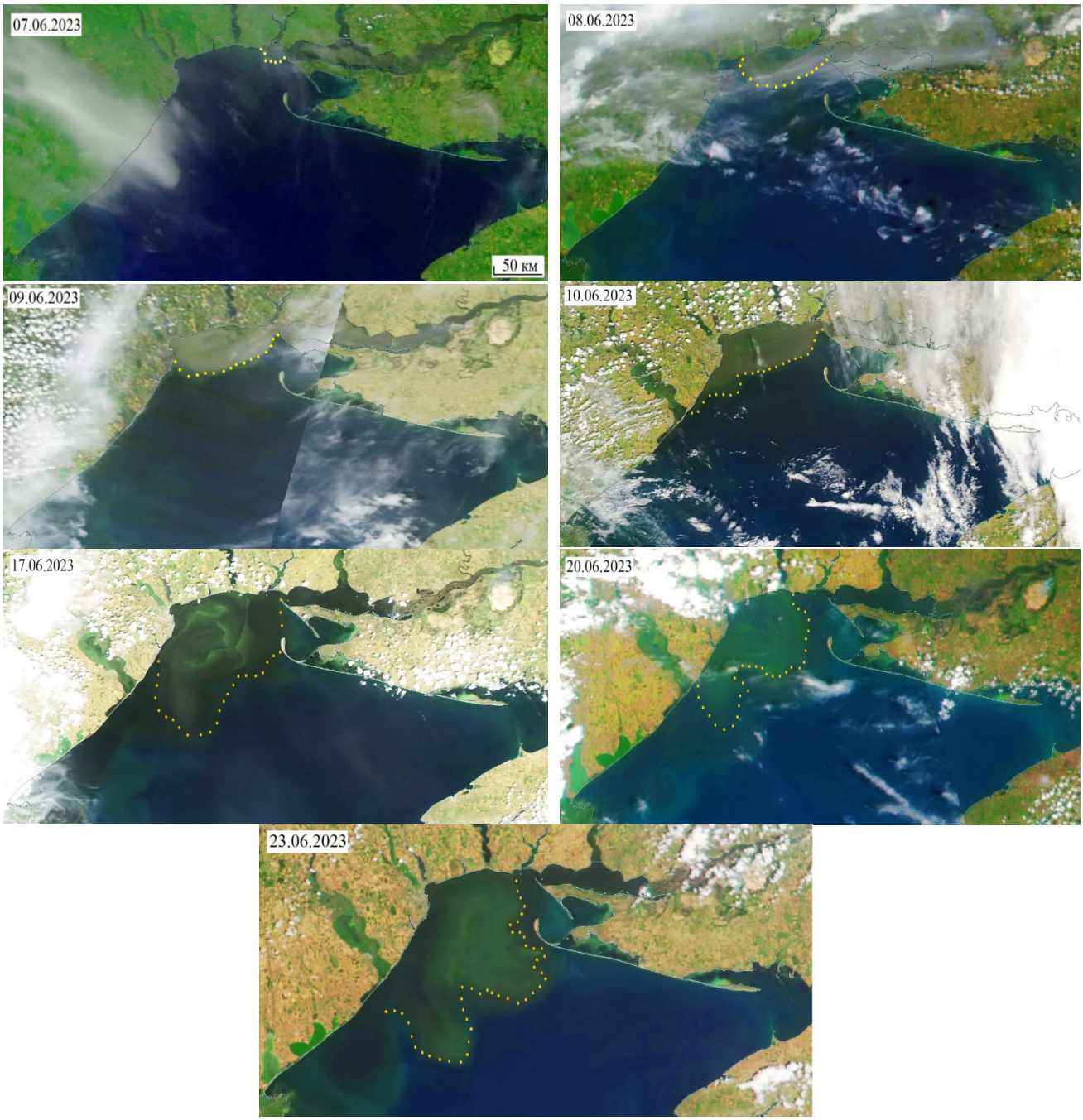


Рис. 6 – Оброблені кольорові супутникові зображення поверхні північно-західної частини Чорного моря, які візуалізують розповсюдження забруднених каламутних вод з Дніпровсько-Бузького лиману
Fig. 6 - Processed color satellite images of the surface of the northwestern part of the Black Sea, which visualize the spread of polluted muddy waters from the Dnieper-Bug estuary

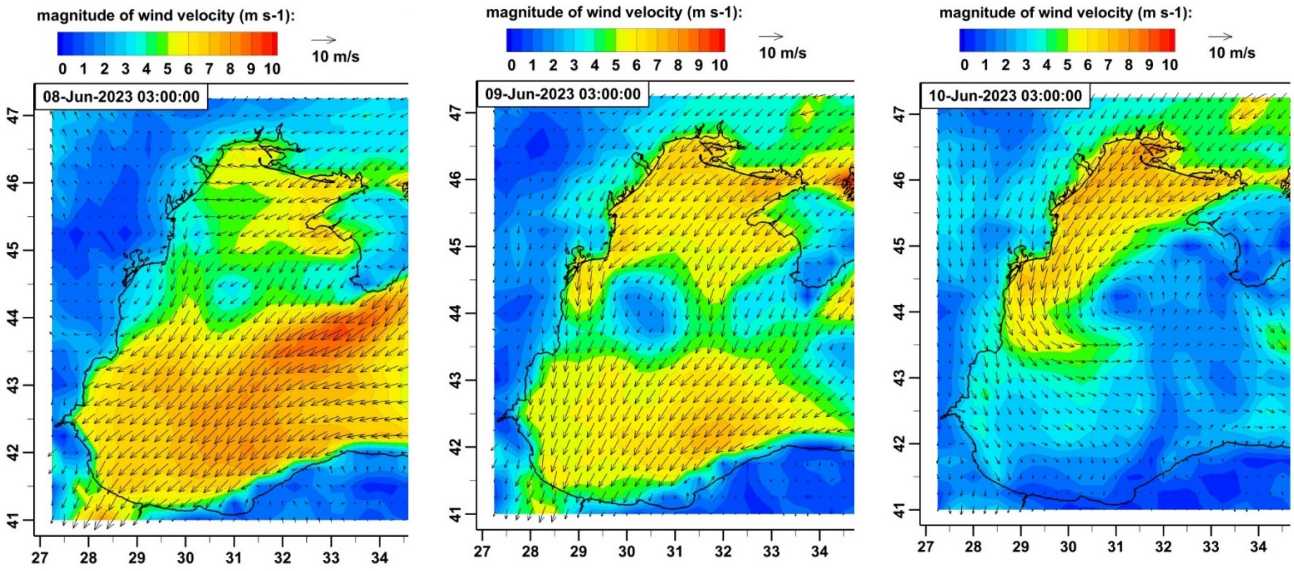


Рис. 7 – Поля вітру над західною частиною Чорного моря за даними архіву GFS прогнозів метеорологічних умов в перші дні після руйнування греблі Каховської ГЕС (08-10.06.2023)
Fig. 7 – Wind fields over the western part of the Black Sea according to the archive of GFS forecasts of meteorological conditions in the first days after the destruction of the Kakhovka HPP dam (08-10.06.2023)

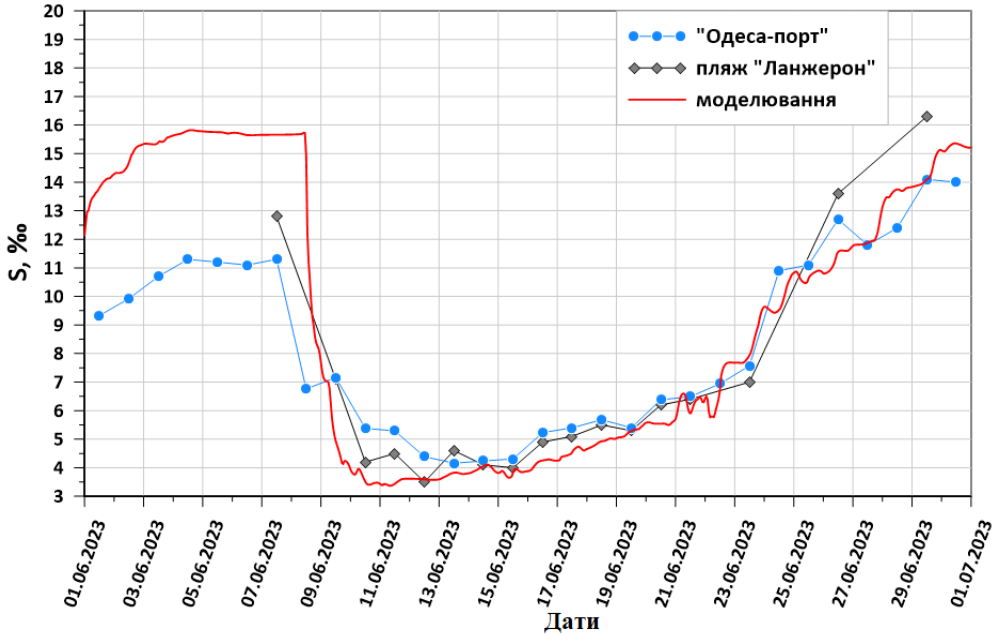


Рис. 8 – Зміни солоності вод поблизу порту Одеса за даними моделювання та спостережень
Fig. 8 – Changes in the salinity of waters near the port of Odesa according to modeling and observations data

Додатково до солоності вод, як показника проникнення трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману до моря, моделювалося поширення на акваторії ПнЗЧМ консервативної домішки нейтральної плавучості. Концентрація домішки в водах Дніпра у пункті Херсон приймалася рівною одній умовній одиниці. Отже результати моделювання наведені на рис. 10 показують концентрацію умовної домішки в розрахункових точках поверхневого шару вод морської акваторії в частках від їх концентрації в гирловій частині річки Дніпро в районі міста Херсон. Ці результати демонструють зменшення концентрації розчиненої у морській воді концентрації умовної забруднюючої речовини, яке відбувається тільки за рахунок дії гідродинамічних чинників (основне розведення). Тобто зміни концентрації

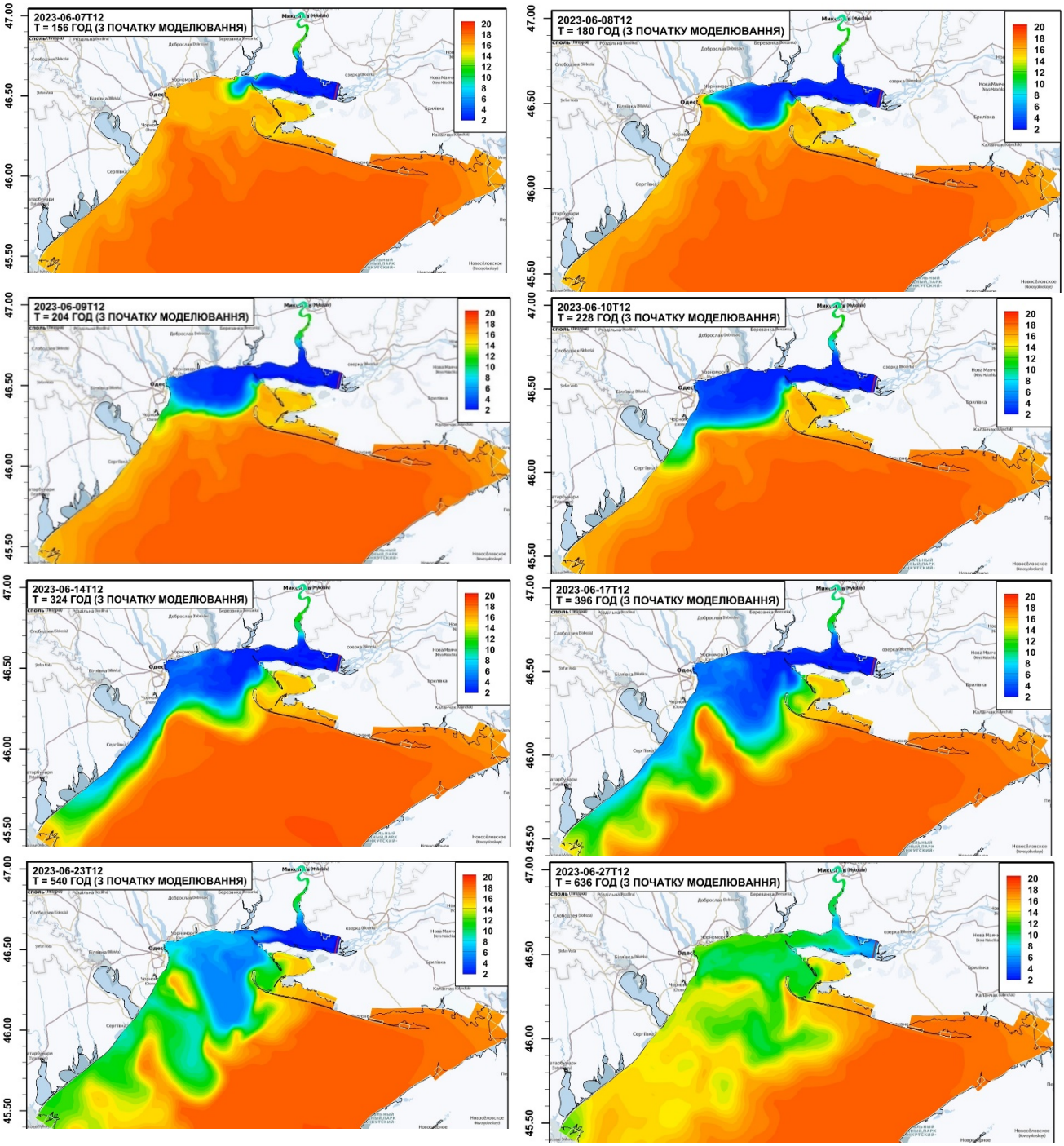


Рис. 9 – Зміни просторового розподілу солоності вод в поверхневому шарі північно-західної частини Чорного моря в період з 07 до 27 червня 2023 р. за результатами моделювання
Fig. 9 – Changes in the spatial distribution of water salinity in the surface layer of the northwestern part of the Black Sea from 07 to 27 June 2023 based on simulation results

забруднюючих речовин в результаті дії хімічних і біологічних процесів, які відбуваються у морській воді, гравітаційного осадження завісі та інших подібних процесів, не враховуються.

Результати моделювання приведені на рис. 10 свідчать, що найбільший рівень забруднення морських вод мав місце на виході із Дніпровсько-Бузького лиману і над Одеською банкою, де, зокрема, 11 червня 2023 р. концентрації умовної домішки змінювались від 0,6 до 1 у.о., тобто дорівнювали 60-100 % від значення на виході з гирла Дніпра. Звертає на

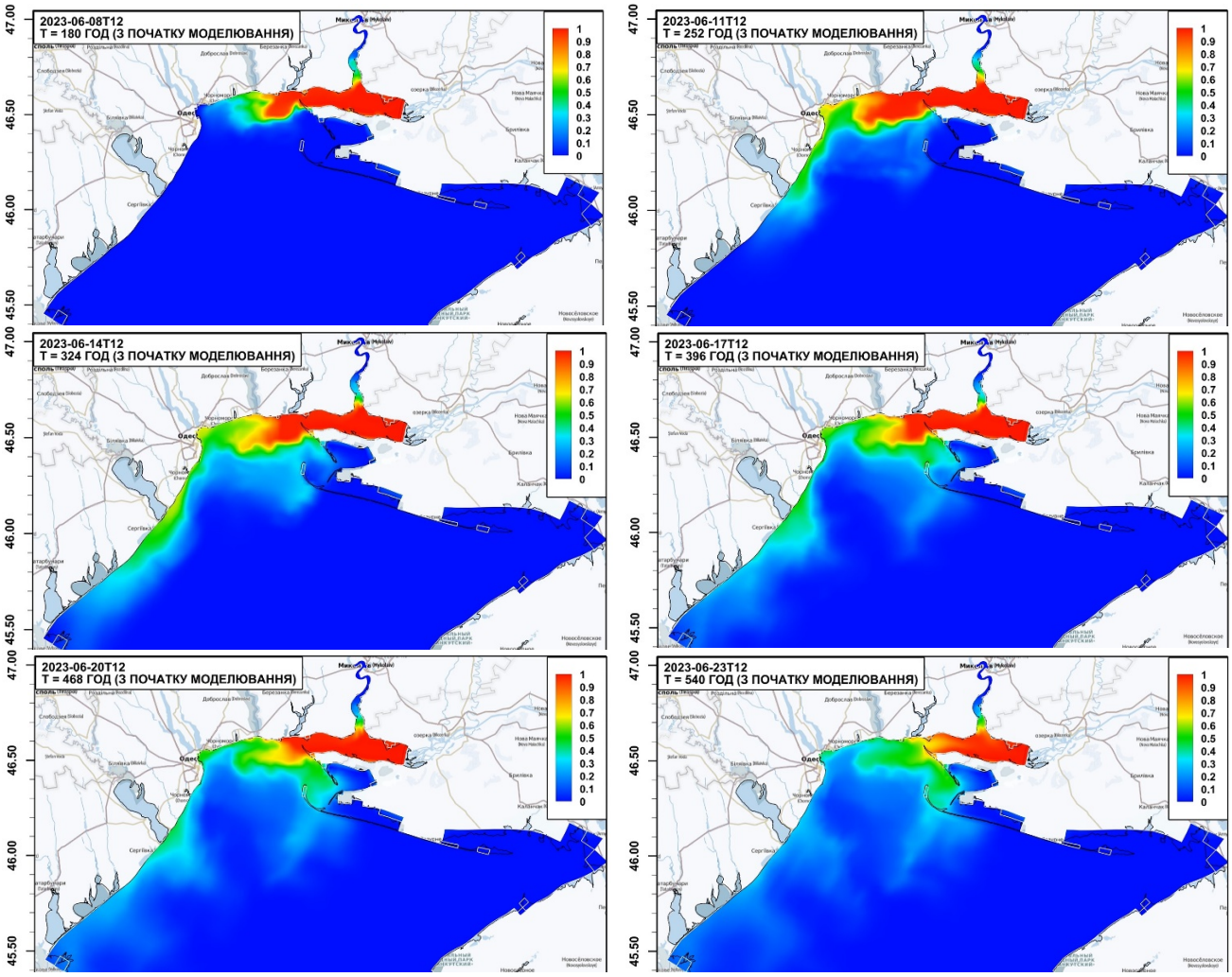


Рис. 10 – Зміни концентрації умовної домішки нейтральної плавучості (у частках від 1 – концентрації в забруднених річкових водах) в поверхневому шарі вод ПнЗЧМ
Fig. 10 – Changes in the concentration of the conditional impurity of neutral buoyancy (in fractions of 1 - concentration in polluted river waters) in the surface layer of waters of the NWBS

себе увагу добре видний прискорений перенос домішки уздовж мілководдя північного узбережжя ПнЗЧМ у сторону м.Одеси, в результаті чого в Одеській затоці формується зона з підвищеним рівнем забруднення відносно оточуючих вод, яка зберігається досить тривалий час.

В період з 10 по 14 червня 2023 р. шлейф підвищених концентрацій умовної домішки (0.3-0.7 у.од.) простежується уздовж західного узбережжя ПнЗЧМ від Одеси до прибережної зони моря прилеглої до коси-пересипу Тузлівських лиманів (с.Лебедівка). Пізніше він звужується до ширини уздовж берегового потоку на ділянці прибережних вод біля м.Чорноморськ (17 червня 2023 р., рис. 10). В той же час утворюється широка локальна зона підвищених концентрацій домішки на Дністровському піднятті дна, яка простежується до 20 червня 2023 р.

Менш виражений шлейф підвищених концентрацій умовної домішки (0,3-0,4 у.од.), ніж вищевказаний, формувався в морі на південь від Кінбурнської протоки уздовж Тендрівського підняття дна.

Станом на 23 червня 2023 р. концентрація домішки в слідах шлейфів забруднених вод над Дністровським, Тузлівським і Тендрівським підняттями дна зменшилась до 0,3 у.од. і нижче.

Описані вище особливості розповсюдження шлейфу розпріснених вод і умовної домішки зумовлені динамікою вод на акваторії ПнЗЧМ. На рис. 11-13 показана просторова структура поверхневих та усереднених за глибиною течій в обрані дні після початку надходження розпріснених і забруднених річкових вод з

Дніпровсько-Бузького лиману до моря. В перші дні після надходження потоку вод з Каховського водосховища до моря в Дніпровсько-Бузькому районі ПнЗЧМ домінували градієнтні стокові течії, максимальні швидкості яких мали місце в Кінбурнській протоці (2,5-3,0 м/с), а в районі мису Північний Одеський вони досягали значень 0,7-0,9 м/с. В цілому можна виділити два основних напрямки переносу вод течіями від Кінбурнської протоки - перший в сторону Одеської затоки (простежувався з 7 по 14 червня) і другий, що обходить Одеську банку з півдня і відповідає гідрофронту між трансформованими річковими водами з низькою солоністю і оточуючими морськими водами з підвищеними значеннями солоності. Швидкості поверхневих течій першого потоку близькі до 0,25 м/с, а другого – дорівнюють 0,9-0,6 м/с уздовж струменя потоку. Другий потік є значно інтенсивнішим через внесок густинних течій у формування поверхневої циркуляції вод. Взагалі, впродовж першого тижня після руйнування греблі вітрові чинники відігравали значно меншу роль у формуванні циркуляції вод і поширенні трансформованих річкових вод на акваторії ПнЗЧМ, ніж градієнтні і густинні течії. З 20 червня 2023 року ситуація змінюється. Під впливом нагінних вітрів вода з моря почала входити до Дніпровсько-Бузького лиману (рис. 13).

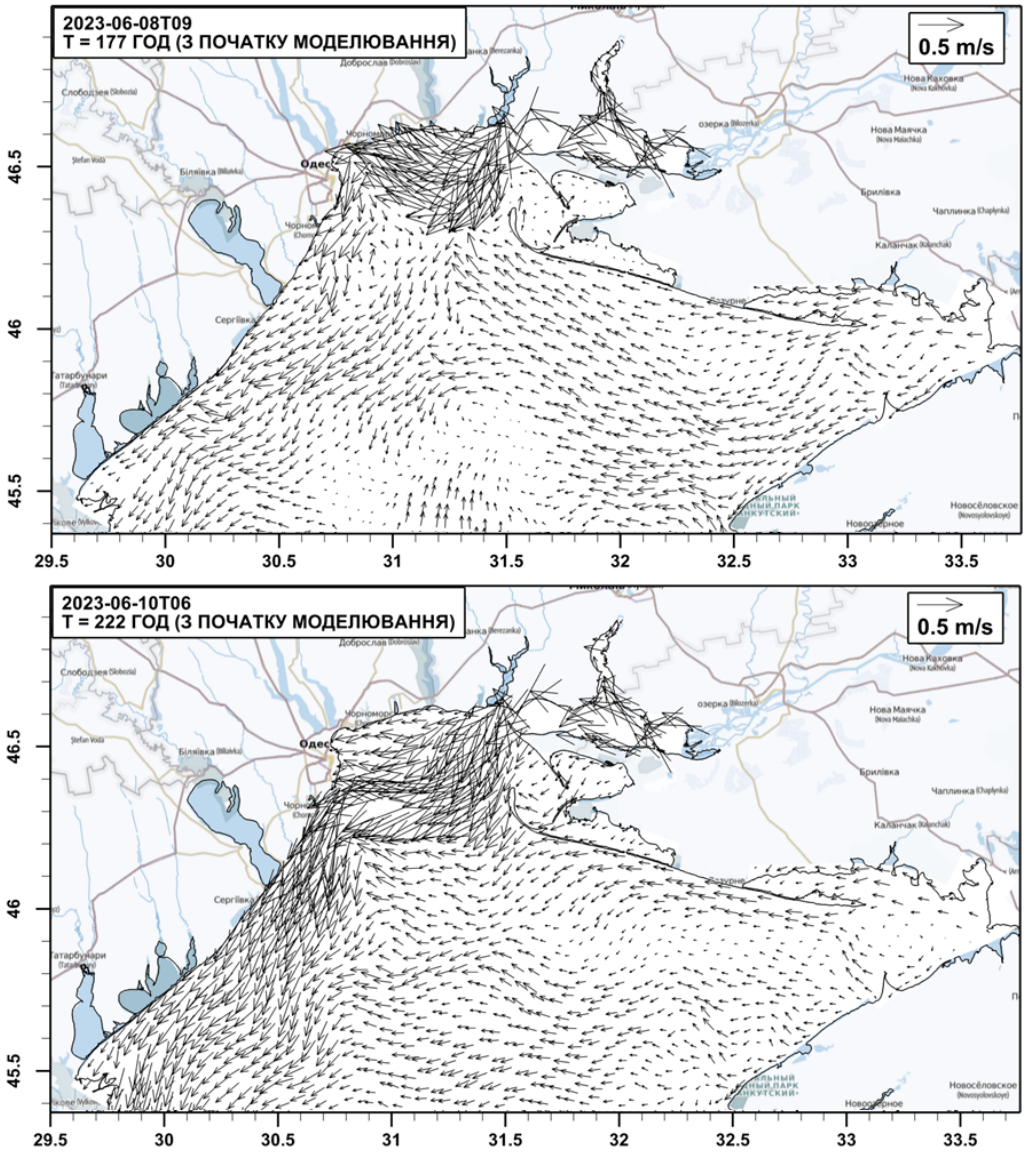


Рис. 11 – Течії у поверхневому шарі вод ПнЗЧМ, змодельовані на дати 08.06.2023 09:00; 10.06.2023 06:00
Fig. 11 – Currents in the surface layer of NWBS water modeled on the dates for 08.06.2023 09:00; 10.06.2023 06:00

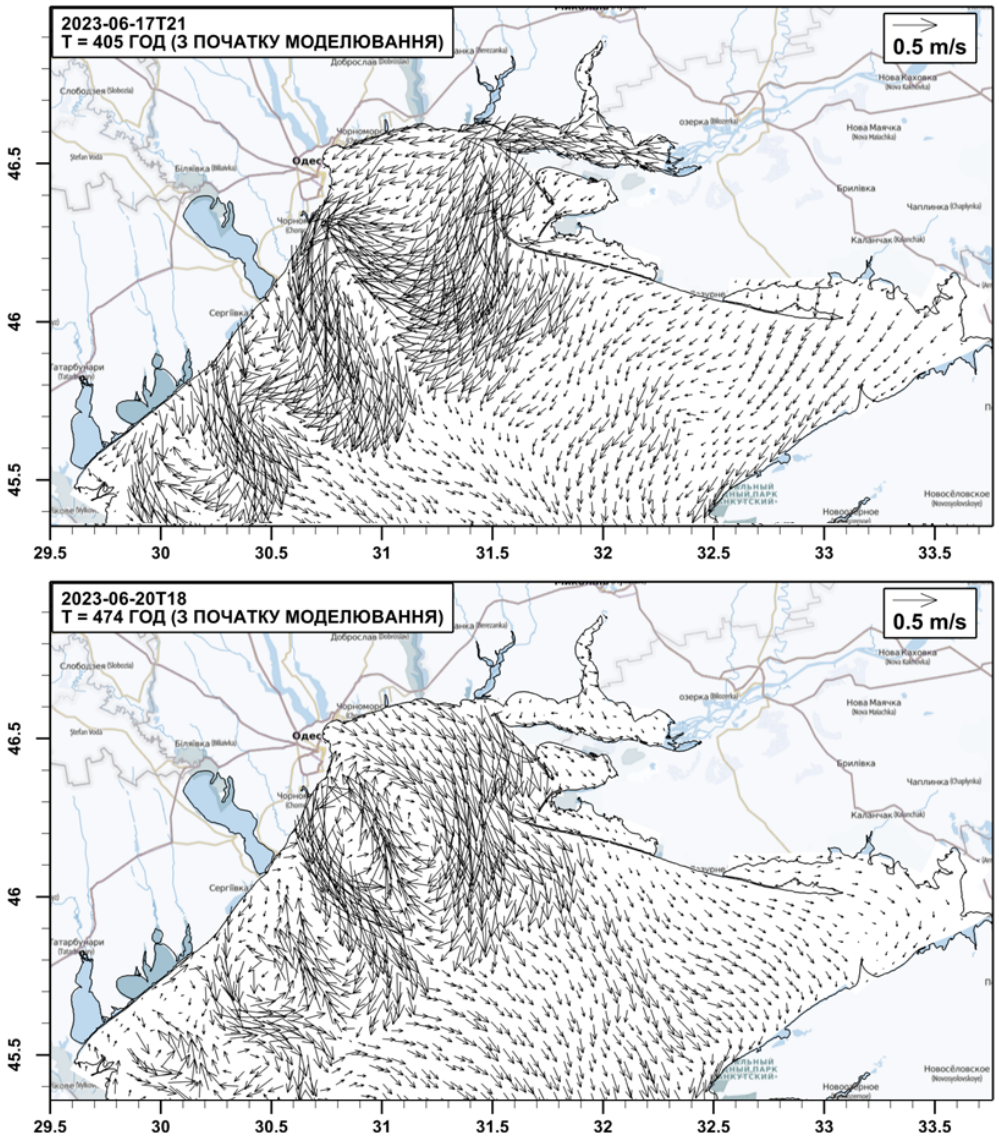


Рис. 12 – Течії у поверхневому шарі вод ПнЗЧМ, змодельовані на дати 17.06.2023 21:00; 20.06.2023 18:00
Fig. 12 – Currents in the surface layer of NWBS water modeled on the dates for 17.06.2023 21:00; 20.06.2023 18:00

Після руйнування греблі Каховської ГЕС з водами Дніпра до ПнЗЧМ потрапила велика кількість біогенних і органічних речовин, які містились в річкових водах, включно з водосховищем, в скаламучених водним потоком донних відкладах (мулах) та були змиті із затоплених територій. На рис. 14 показані зміни у часі концентрації основних біогенних речовин і завісі у морі поблизу пляжу Ланжерон (м.Одеса) за даними моніторингу Державної екологічної інспекції Південно-Західного округу [17]. В перші дні після досягнення шлейфом забруднених перехідних вод одеського узбережжя спостерігались високі концентрації амонійного азоту, який є початковою формою мінерального азоту, що утворюється в результаті мінералізації органічної речовини. Його високі концентрації сприяють швидкому спалаху біомаси водоростей. Висока концентрація амонійного азоту у морський воді вказує на надходження його з джерел, де відбувається інтенсивна мінералізація органічної речовини, серед яких можуть бути системи каналізування населених пунктів, вигрібні ями, тваринницькі господарства та інші.

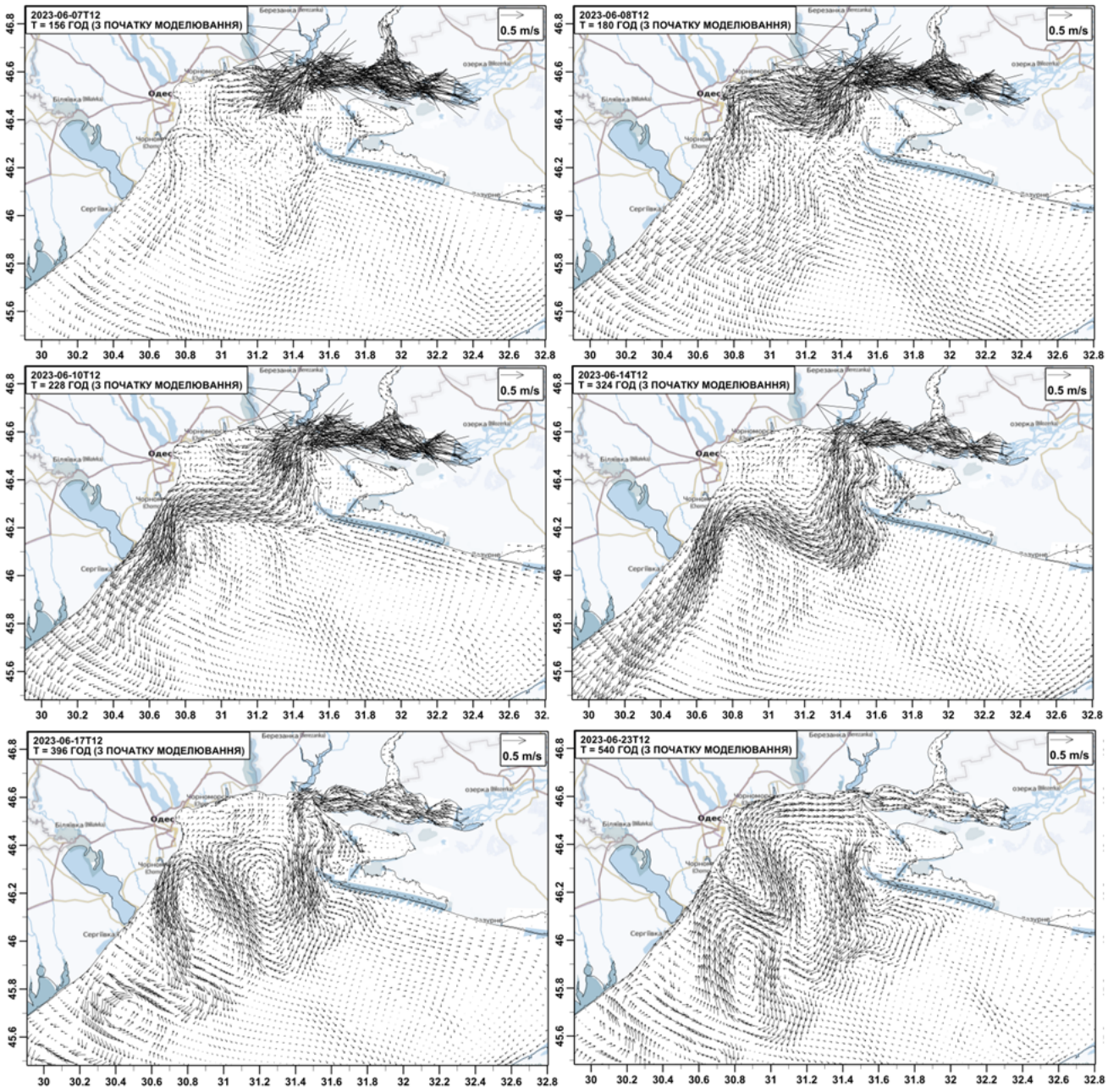


Рис. 13 – Поля векторів усередненої за глибиною швидкості течії, м/с, на акваторії північно-західної частини Чорного моря в період з 07 по 23 червня 2023 р. за результатами моделювання
Fig. 13 – Vector fields of the depth-average current velocity, m/s, in the water area of the northwestern part of the Black Sea from 7 to 23 June 2023 based on simulation results

В часовій мінливості концентрацій нітратів і зважених речовин, на загальному фоні високих їх значень після досягнення шлейфом забруднених трансформованих річкових вод одеського узбережжя, простежуються два великих піка – 10 і 14 червня. Зміни концентрації фосфатів характеризуються стабільно високими їх значеннями в період з 10 по 12 червня 2023 року, а потім їх відносним зменшенням.

Надходження великої кількості біогенних речовин і лабільної органіки до моря в умовах його надзвичайного і тривалого розпріснення призвело до спалаху цвітіння фітопланктону в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі ПнЗЧМ [22, 23]. На рис. 15 показані зміни просторового розподілу хлорофілу-а в період з 10 по 23 червня 2023 р., який є прямим показником цвітіння водоростей. Хоча характерне значення хлорофілу-а в північно-

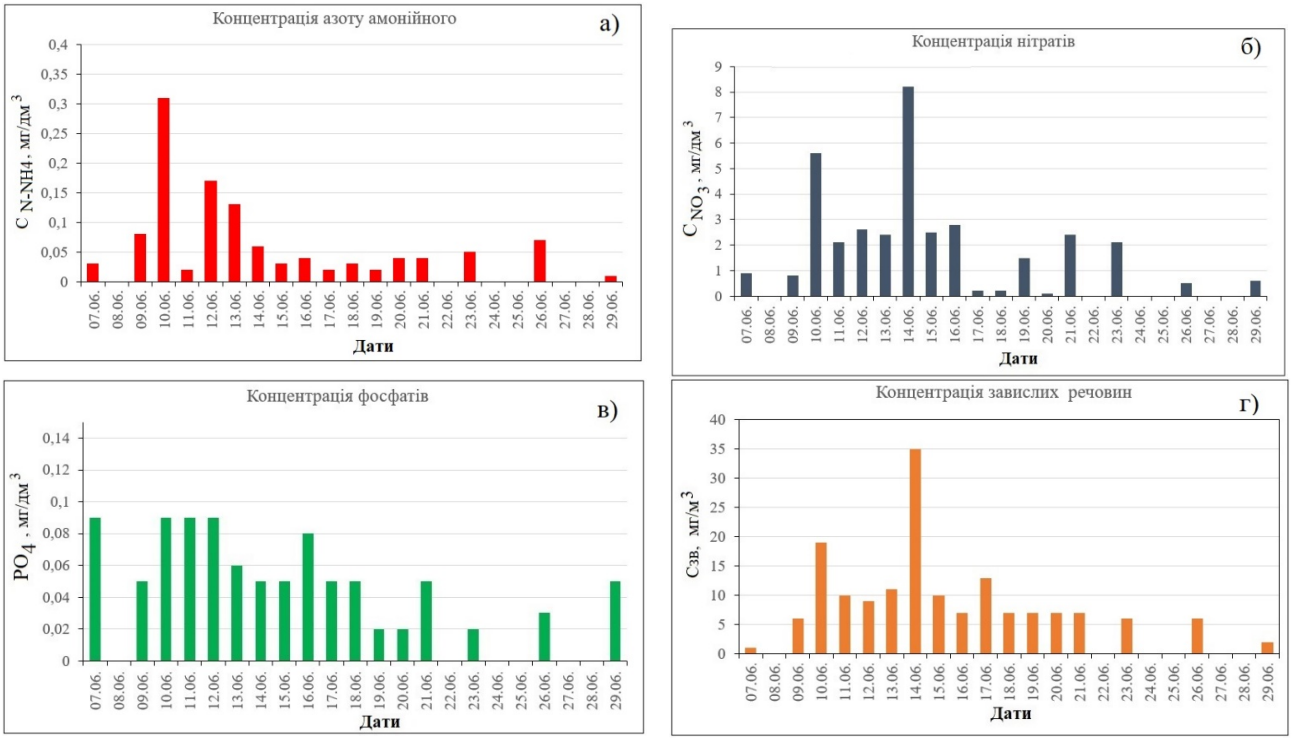


Рис. 14 – Часова динаміка концентрації біогенних і завислих речовин в районі пляжа Ланжерон (місто Одеса) у червні 2023 р. після руйнування греблі Каховської ГЕС

Fig. 14 – Time dynamics of concentration of nutrients and suspended substances in the area of Langeron beach (Odesa city) in June 2023 after the destruction of the Kakhovka HPP dam

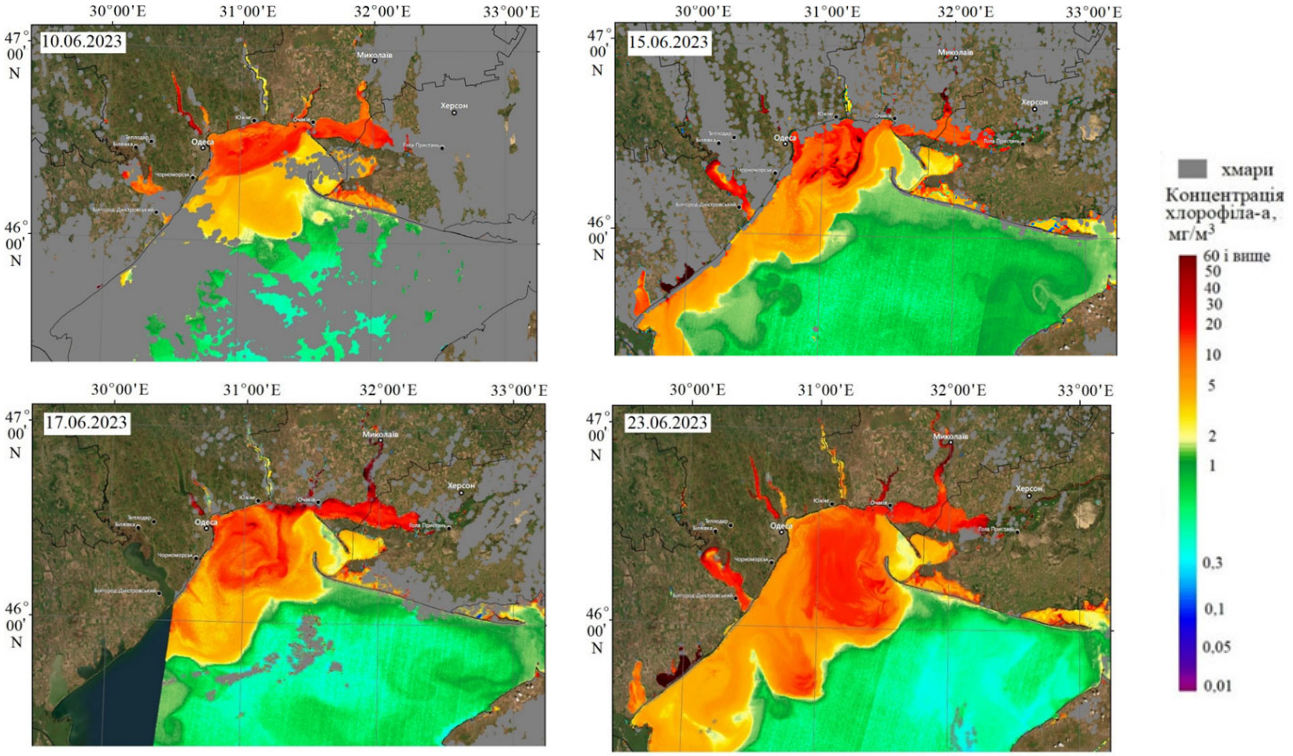


Рис. 15 – Зміни просторового розподілу концентрації хлорофілу-а на акваторії ПнЗЧМ

Fig. 15 – Changes in the spatial distribution of chlorophyll-a concentration in the NWBS water area

західній частині Чорного моря не перевищує декількох мг/м^3, в результаті надходження забруднених трансформованих річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману утворились обширні зони з концентраціями, які значно перевищують 5 мг/м^3. Їх межі відповідають розташуванню шлейфу розпрісненних вод. Максимальні концентрації хлорофілу-а (більші за 5 мг/м^3) спостерігаються в межах шлейфу розпріснення оконтуреного гідрофронтом, в зонах відносного послаблення швидкості течій.

ВИСНОВКИ

В роботі на підставі аналізу супутникових знімків кольору поверхні моря, результатів математичного моделювання із використанням чисельної гідродинамічної моделі D-Flow FM встановлено особливості розповсюдження в північно-західній частині Чорного моря великих обсягів розпріснених і забруднених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману, які надійшли до нього в результаті руйнування греблі Каховської ГЕС у червні 2023р.

Встановлено, що шлейф розпріснених (з солоністю < 10 ‰) і забруднених вод спочатку розповсюджувався в Дніпровсько-Бузькому пригирловому районі ПнЗЧМ у напрямку узбережжя міста Одеса, якого він досяг 9-10 червня 2023 р. Потім шлейф почав поширюватись уздовж західного узбережжя і 14 червня 2023р. досяг району розташування Тузловських лиманів. У подальшому відбувалося розмивання вузького шлейфу розріснених вод, витягнутого уздовж західного узбережжя, у сторону відкритого моря у вигляді «язиків» вод зі зниженою солоністю, які утворилися в районах Дністровського та Дунай-Дністровського (Тузлівського) піднять дна моря. Також відбувалось поширення шлейфу розпріснених вод на південь від Одеської банки в сторону відкритого моря через Тендрівське підняття дна.

Моделювання розповсюдження консервативної домішки нейтральної плавучості як трасера розповсюдження забруднень з перехідними водами з Дніпровсько-Бузького лиману показало, що тільки за рахунок гідродинамічного розведення відбувається зменшення рівня забруднення до 60 % (від рівня забруднення на виході з гирла Дніпра в районі міста Херсон) в Одеському районі ПнЗЧМ і до 30 % – в акваторії Дунай-Дністровського межиріччя.

Вказані особливості розповсюдження шлейфу розпріснених вод і умовного забруднювача (домішки) визначаються характером циркуляції вод на акваторії північно-західної частини Чорного моря. Розрахунки течій за гідродинамічною моделлю показали, що в перші дні після надходження вод з Каховського водосховища до моря в Дніпровсько-Бузькому районі домінували градієнтні стокові течії, а у подальшому - густинні течії, сформовані на гідрофронті між трансформованими річковими водами і солоними морськими.

Вітрові умови впливали на характер поширення на акваторії ПнЗЧМ шлейфу розпріснених перехідних вод з Дніпровсько-Бузького лиману, визначали положення і конфігурацію гідрофронту між трансформованими річковими і оточуючими морськими водами. Вітрові течії хоча і не були домінуючими, але впливали на динаміку вод і розподіл концентрацій домішки, наприклад хлорофілу-а, в межах шлейфу опріснення оконтуреного гідрофронтом, сприяли проникненню трансформованих річкових вод в сторону Одеси уздовж прибережного мілководдя.

У майбутньому автори мають намір продовжити дослідження шляхом використання моделі якості вод для врахування неконсервативності домішок хіміко-біологічної природи (фітопланктону, біогенних і органічних речовин, кисню), з метою прогнозування довготривалих наслідків руйнування греблі Каховської ГЕС для екосистеми моря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. National Pilot Monitoring Studies and Joint Open Sea Surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2017: Final Scientific Report / Slobodnik J., Alexandrov B., Komorin V. et al. Dnipro: Seredniak T.K., 2020, pp. 1-97.
2. Komorin V. Assessment of the Black Sea shelf ecosystem sustainability with mathematical simulation method. *Geographia Technica*. 2021. 16(2). Pp. 19–28. https://doi.org/10.21163/GT_2021.162.02
3. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. 2023. / Vishnevskyi V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Y., Gleick P. *Water International*. 2023. 48(5). Pp. 631–647 https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679
4. Коморін В. М. Теоретико-методологічні аспекти управління екосистемними ризиками моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. 31. С. 33-54. https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.03
5. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология: монография / под ред. Ю.П. Зайцева,

Б.Г. Александрова, Г.Г. Миничевой. Киев: Наукова думка. 2006. С.25-118.
6. Тучковенко Ю. С., Иванов В. А., Сапко О. Ю. Оценка влияния береговых антропогенных источников на качество вод Одесского района северо-западной части Черного моря: монография / Морской гидрофиз. ин-т НАНУ; Од. гос. эколог. ун-т. Севастополь: НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 169 с.
7. Влияние гидрологических условий на изменчивость гидрохимических и гидробиологических характеристик вод Одесского региона северо-западной части Черного моря / Тучковенко Ю. С., Доценко С. А., Дятлов С. Е., Нестерова Д. А., Скрипник И. А., Кирсанова Е. В. *Морской экологический журнал*. Севастополь: НАН Украины, МГИ. 2004. 3(4). С. 75 - 85. http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/ 2466/
8. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР: Справочник. Т. 4. Черное море. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. 99 с.
9. Большаков В. С. Трансформация речных вод в Черном море: монография. Киев: Наукова думка, 1970. 328 с.
10. Обухов Є. В. Економіко-екологічні оцінки проектів великих українських водосховищ: монографія. Одеса: ТОВ «ІНВАЦ», 2008. 100 с.
11. Обухов Е. В. Каховскому водохранилищу – 55 лет. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. 10. С.116-125.
12. Аверченко Д. А. Каховскому водохранилищу и Днепру нужен Бассейновый парламент. Начнем с общественного. *Зеркало недели.* 2006. URL: https://zn.ua/ECOLOGY/kahovskomu_vodohranilischu_i_dnepru_nuzhen_basseynovyy_parlament_nachnem_s_obschestvennogo.html (дата звернення 14.10.2023)
13. Вишневський В. І., Куций А. В. Багаторічні зміни водного режиму річок України: монографія. Київ: Наукова думка, 2022. 252 с.
14. Національна академія наук України: офіційний сайт (2023). Аналіз перебігу затоплення територій Херсонської області внаслідок руйнації гідроспоруд Каховської ГЕС. URL: https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=10209 (дата звернення: 27.08.2023)
15. Тучковенко Ю. С., Степаненко С. М. Вплив руйнування греблі Каховської ГЕС на екологічний стан Одеського району Чорного моря. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2023, 44. С. 71-80. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80
16. NASA WORLDVIER Base Layers. Corrected reflectance (True Color) URL: https://worldview.earthdata.nasa.gov (дата звернення: 10.10.2023)
17. Департамент екології та природних ресурсів Одеської ОДА. Довідка про надзвичайну ситуацію внаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС. URL: https://ecology.od.gov.ua/dovidka-pro-nadzvychajnu-sytuacziyu-vnaslidok-rujnuvannya-damby-kahovskoyi-ges-2/ (дата звернення: 10.10.2023)
18. Deltares. D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 2023, SVN revision: 78723. Delft, the Netherlands URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (дата звернення: 30.08.2023 р.).
19. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. URL: https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/ (дата звернення: 30.08.2023).
20. The GFS Atmospheric Model. URL: http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html (дата звернення: 30.08.2023).
21. Black Sea Physics Analysis and Forecast. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). https://doi.org/10.25423/cmcc/blksea_analysisforecast_phy_007_001_eas5 (дата звернення: 30.08.2023).
22. Український науковий центр екології моря. Цвітіння фітопланктону в Одеській затоці після підриву Каховської дамби. (публікація від 22 червня 2023 р.). URL: https://www.facebook.com/UkrSCES (дата звернення: 12.07.2023)
23. Інститут морської біології НАН України. Динаміка основних параметри морської екосистеми в українському секторі північно-західної частини Чорного моря в перший місяця після екологічної катастрофи руйнування Каховської дамби 06.06.2023 URL: http://www.imb.odessa.ua/?id=20904107 (дата звернення: 15.10.2023)

REFERENCES

1. Slobodnik, J., Alexandrov, B., Komorin, V. et al. (2020). *National Pilot Monitoring Studies and Joint Open Sea Surveys in Georgia, Russian Federation and Ukraine, 2017*: Final Scientific Report. Dnipro: Seredniak T.K., pp. 1-97.
2. Komorin, V. (2021) Assessment of the Black Sea shelf ecosystem sustainability with mathematical simulation method. *Geographia Technica*, 16(2), pp. 19–28. https://doi.org/10.21163/GT_2021.162.02
3. Vishnevskyi, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Oleynik, Y. & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. 2023. *Water International*, 48(5), pp. 631–647. https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679
4. Komorin, V. (2023). Theoretical and methodological aspects of sea ecosystem risks management. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 31, pp. 33-54. https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.03
5. Zaitsev, Y.P., Aleksandrov, B.G. & Minicheva, G.G. (eds.), (2006). *Severo-zapadnaya chast' Chernogo morya: biologiya i ekologiya [The North-Western Part of the Black Sea: Biology and Ecology]*. Kiev : Naukova Dumka, pp. 25-118. (in Russ.)
6. Tuchkovenko, Yu.S., Ivanov, V.A. & Sapko, O.Yu. (2011). *Otsenka vliyaniya beregovykh antropogennykh istochnikov na kachestvo vod Odesskogo regiona severo-zapadnoy chasti Chernogo morya [Assessment of the coastal anthropogenic sources impact on water quality in north-western part of Black Sea near Odessa]*. Marine Hydrophysical Institute of NASU, Odessa State Environmental University. Sevastopol: SPC EKOSI-Gidrofizika Publ. (in Russ.)
7. Tuchkovenko, Y.S., Docenko, S.A., Dyatlov, S.E., Nesterova, D.A., Skripnik, I.A. & Kirsanova, E.V. (2004). Influence of hydrological conditions on variability of hydrochemical and hydrobiological characteristics of waters in Odessa region in northwestern part of the Black Sea. *Marine Ecological Journal*, 3(4), pp.75-85. http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/2466/ (in Russ.)
8. *Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoy zony morey SSSR: Spravochnik [Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the seas of the USSR: Reference book]*

Vol. 4. *Chernoe more [Black Sea]*. (1986). Leningrad: Hydrometeoizdat (in Russ.)
9. Bolshakov, V.S. (1970). *Transformaciya rechnyh vod v Chernom more [Transformation of river waters in the Black Sea]*. Kyiv: Naukova Dumka (in Russ.)
10. Obukhov, E.V. (2008). *Ekonomiko-ekolohichni otsinky proektiv velykykh ukrainskykh vodoskhovyshch [Economic and environmental assessments of projects of large Ukrainian reservoirs]*. Odesa: "INVATS" LLC. (in Ukr.)
11. Obukhov, E.V. (2012). Kakhovsky reservoir – 55 years. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 10, pp.116-125. (in Russ.)
12. Averchenko, D.A. (2006). The Kakhovsky reservoir and the Dnieper need the Basin Parliament. Let's start with the public. *Mirror of the week.* Available at: https://zn.ua/ECOLOGY/kahovskomu_vodohranilischu_i_dnepru_nuzhen_basseynovyy_parlament_nachnem_s_obschestvennogo.html (Accessed: 14.10.2023) (in Russ.)
13. Vyshnevskyi, V. & Kutsiy, A. (2022). *Bahatorichni zminy vodnoho rezhymu richok Ukrainy. [Long-term changes in the water regime of rivers in Ukraine]*. Kyiv: Naukova Dumka. (in Ukr.)
14. National Academy of Sciences of Ukraine: official website (2023). *Analysis of the course of flooding of the territories of the Kherson region due to the destruction of the hydroelectric structures of the Kakhovka HPP.* Available at: https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=10209 (Accessed: 27.08.2023) (in Ukr.)
15. Tuchkovenko, Y. & Stepanenko, S. (2023). The impact of destruction of the Kakhovka dam on the environmental status of the Odesa area of the Black Sea. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, (44), pp. 71-80. https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80 (in Ukr.)
16. *NASA WORLDVIER Base Layers. Corrected reflectance (True Color).* URL: https://worldview.earthdata.nasa.gov (Accessed: 10.10.2023)
17. Department of environment and natural resources of Odessa regional state administration (2023). *Certificate on the emergency situation due to the destruction of the Kakhovka HPP dam.* Available at: https://ecology.od.gov.ua/dovidka-pro-nadzvychajnu-sytuacziyu-vnaslidok-rujnuvannya-damby-kahovskoyi-ges-2/ (Accessed: 10.10.2023). (in Ukr.)
18. Deltares (2023). *D-Flow Flexible Mesh – Computational Cores and User Interface – User Manual, version: 2023, SVN revision: 78723*. Delft, the Netherlands URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/D-Flow_FM_User_Manual.pdf (Accessed: 30.08.2023 p.).
19. *NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive.* URL: https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/ (Accessed: 30.08.2023).
20. *The GFS Atmospheric Model.* URL: http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html (Accessed: 30.08.2023).
21. *Black Sea Physics Analysis and Forecast. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS).* Marine Data Store (MDS). https://doi.org/10.25423/cmcc/blksea_analysisforecast_phy_007_001_eas5 (Accessed: 30.08.2023).
22. *Ukrainian scientific center of Ecology of Sea (UkrSCES). Blooming of phytoplankton in the Odesa Bay after the explosion of the Kakhovskaya Dam.* (published on June 22, 2023). Available at: https://www.facebook.com/UkrSCES (Accessed: 12.07.2023) (in Ukr.)
23. Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine*:* official site*. Dynamics of the main parameters of the marine ecosystem in the Ukrainian sector of the northwestern part of the Black Sea in the first month after the ecological disaster of the destruction of the Kakhovka Dam 06.06.2023.* Available at: http://www.imb.odessa.ua/?id=20904107 (Accessed: 15.10.2023). (in Ukr.)

CHARACTERISTICS OF BLACK SEA DISPERSION OF FRESHENED AND POLLUTED TRANSITIONAL WATERS FROM THE DNIPRO-BUG ESTUARY AFTER DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA RESERVOIR DAM

Yu. S. Tuchkovenko[1,2], D. V. Kushnir[1], V. A. Ovcharuk[1], A. V. Sokolov[3], V. N. Komorin[4]

[1]Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine,
tuch2001@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-3275-9065
[2]Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine,
37 Pushkinska Str., Odesa, 65048, Ukraine
[3]National Center Space Facilities Control and Test Center
Ukraine, mriya1spacecenter@gmail.com
[4]Ukrainian Scientific Center of Ecology of the Sea,
89 Frantsuzsky Blvd., Odesa, 65009, Ukraine, vkomorin@gmail.com

This study examines the characteristics of distribution of large volumes of freshened and polluted transitional waters from the Dnipro-Bug estuary across the northwestern part of the Black Sea (NWBS) that was caused by destruction of the Kakhovka HPP dam in June 2023. From June 6, 2023 to June 12, 2023 14.4 km³ of water were discharged from the Kakhovka Reservoir into the Dnipro-Bug estuary and subsequently into the sea. This volume constitutes 27% of the total annual

average natural runoff of the Dnipro River (53.5 km³). During the initial days following the dam destruction water flow through the breach amounted to 40-50 thousand m³/s. The water carried a variety of pollutants into the sea that were present in the water of the Kakhovka Reservoir, in its bottom sediments, and also washed off from the flooded territories of the lower Dnipro area (more than 2000 hectares).

The analysis of the distribution characteristics was conducted using satellite images of the sea surface color and chlorophyll a concentrations, as well as the results of hydrodynamic modeling with application of the 3-D variant of a numerical hydrodynamic model Delft3D-Flow Flexible Mesh. It was established that the plume of freshened and polluted water initially spread across the Dnipro-Bug estuarine region of the NWBS and then moved towards the sea coast of Odesa reaching it on June 9-10, 2023. Subsequently, the plume began to spread along the western sea coast and reached the Tuzlivski Limans area on June 14, 2023. After this the narrow plume of dispersed water along the sea coast began to dilute when moving towards the open sea in the form of "tongues" that had formed over the sea bottom elevations. The modeling of dispersion of a conservative neutral buoyancy admixture serving as a marker of pollution spread with the transitional waters from the Dnipro-Bug estuary showed that reduction in pollution levels took place solely due to hydrodynamic dilution (up to 60% in Odesa District of the NWBS and up to 30% in the Danube-Dniester interfluve area of the river water pollution level observed in Kherson).

The identified characteristics were determined based on the water circulation process that formed in the Dnipro-Bug estuarine area under the influence of significant sea level gradients resulting from the inflow of large volumes of freshened transitional waters through the estuary and the Kinburn Strait during the first days, and then followed by the density currents formed at the hydrofront between the transformed river water and surrounding sea. The influence of wind conditions manifested itself in the form of spread across the NWBS of the plume of dispersed transitional water from the Dnipro-Bug estuary and the hydrofront's position and configuration. Though wind-induced currents were not dominant, they still influenced the water dynamics and distribution of concentrations of admixtures, for instance, chlorophyll a, within the freshened plume that was outlined by the hydrofront. They also promoted penetration along the coastal shallow area of transformed river water towards Odesa.

Keywords: dam destruction, the Kakhovka Reservoir, the Black Sea, northwestern part, dispersion of transitional waters, satellite data, modeling

Подання до редакції **: 14. 11. 2023**
Надходження остаточної версії **: 20. 11. 2023**
Публікація статті : **21. 12. 2023**

Ukrainian hydrometeorological journal, 2023, 32, 115-129 doi: 10.31481/uhmj.32.2023.08
ISSN 2311-0902 (print), 2616-7271 (online)

УДК 550.47

БІОГЕОХІМІЧНЕ ЛИХЕНОІНДИКАЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ТА ЧАСОВИХ ЗМІН АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ДЕНДРОПАРКУ «ОЛЕКСАНДРІЯ»

О. В. Шабатура[1], Ю. Г. Тютюнник[2], О. Б. Блюм[3]

1 - Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна, oshabatura@knu.ua
2 - Національний ботанічний сад ім. М.М. Гришка НАН України,
вул. Тимирязівська, б. 1, м, Київ, 01014, Україна, yulian.tyutyunnik@gmail.com
3 - Національний ботанічний сад ім. М.М. Гришка НАН України,
вул. Тимирязівська, б. 1, м, Київ, 01014, Україна, oleg_blum@ukr.net

Методом біогеохімічної ліхеноіндикації на території дендропарку «Олександрія» і прилеглих територій (м. Біла Церква, Київська обл., УКРАЇНА) встановлено рівні середнього багаторічного вмісту K, Ca, Al, Fe, Mg, Na, Mn, Zn, Sr, Ti, Ba, Cu, B, Pb, Ni, V, Cr, Co, Cd, Se, Sb у приземному повітрі. Метою дослідження є вивчення стану та динаміки атмогеохімічного поля на території дендропарку «Олександрія» та його околиць (м. Біла Церква Київської обл.). Інструментом дослідження є метод біогеохімічної ліхеноіндикації за показаннями вмісту мікро- та макроелементів в сланях епіфітних лишайників. Зразки епіфітних листуватих *Parmelia sulcata*, *Xanthoria parietina* та кущового *Evernia prunastri* лишайників, зібрані у 2009 (20 точок) та 2021 (23 точки), були проаналізовані на вміст 22 хімічних елементів за допомогою методу ICP-OES спектроскопії.

Для ідентифікації можливих джерел надходження в лишайники визначених елементів було застосовано факторний аналіз (а саме метод головних компонент з обертанням факторів Varimax). Шість отриманих факторів представляють грунтовий покрив (перші найзначущі фактори F_1 – F_3) та антропогенні компоненти (малі полігенетичні фактори F_4 – F_6). Із зниженням номеру фактора знижується його частка в загальній пояснювальній дисперсії. Головні фактори забруднення (F_1 – F_3): загальне пилове навантаження на атмосферу з переважанням теригенної складової (здебільшого крупно-дисперсні часточки) – F_1; пило-аерозольне навантаження на територію дендропарку з боку міста Біла Церква, що в значній мірі забезпечується мікрокліматичною циркуляцією типу міського бризу і проявляється у формуванні своєрідної атмогеохімічної асоціації, яка складається з хімічних елементів, властивих для будіндустрії і виробництва будматеріалів – F_2; потужні, проте локальні (імпактні) атмотехногенні впливи – F_3. Для малих факторів, із зниженням значимості джерела атмосферного забруднення, знижується їх однозначна дискримінація, все більше проявляється гетерогенність (розщеплення факторів на підфактори) і помітна часова динаміка (зміна інтенсивності фактора в залежності від часу обстеження). Фактор 4 має дві геохімічні підасоціації, які пов'язуються із впливом на ландшафти «Олександрії» екологічної катастрофи 1990-х років (потрапляння у грунт нафтопродуктів (геохімічний маркер - V) і відходів гальванічного виробництва (Zn, Mg, Cr та Ni й Ti), а також скидів агропідприємств (K). Особливість F_4 – поступове зниження його інтенсивності з часом. F_5 слід інтерпретувати як навантаження на довкілля виключно «гальванічного забруднення» із зміною провідного маркера кобальта на мідь. F_6 будемо вважати фактором впливу на екосистеми «Олександрії» суто нафтопродуктового забруднення.

Ключові слова: лишайники; біогеохімічна ліхеноіндикація; мікро- та мікроелементи елементи; важкі метали; забруднення повітря; факторний аналіз; дендропарк «Олександрія».

1 ВСТУП

Біогеохімічна лихеноіндикація (БГХЛ-індикація) є сучасним методом планшетного геохімічного моніторингу стану навколишнього середовища. Епіфітні лишайники є гарними поглиначами з повітря хімічних елементів і сполук техногенного походження, які надходять в їхні слані у складі пило-аерозольних випадань, гідрометеорів, атмосферних опадів, включаючи стовбурний

стік, а також газів, у формі яких мігрує частина деяких хімічних елементів – As, Hg, P, S та ін. І хоча й досі існують певні невирішені методичні питання, популярність БГХЛ-індикації велика і використовується вона досить широко. Перш за все, метод застосовується для вивчення просторової структури атмосферного забруднення. З його допомогою віднаходять також джерела забруднення атмосфери. В останні роки постають більш складніші завдання, в яких користуються не даними про прямий вміст хімічних елементів в рослинах, а так званими показниками збагачення (по Al, Ti або Sc), котрі передають ступінь теригенного або техногенного впливу на склад атмосферного повітря. Для аналізу даних БГХЛ-індикації набули популярності різноманітні геостатистичні методи обробки: факторний аналіз, біплот, варіограмний аналіз та ін., вони є ефективними для виявлення закономірностей атмогеохімічного поля. Якщо для однієї і тієї ж самої території застосувати БГХЛ-дослідження за різні часові періоди (від декількох – 5-6-ти – до сотень років), то можна оцінити фактичні зміни стану атмогеохімічного поля, а також їхні причини цих змін. Для «історичних» досліджень застосовуються повторні пробовідбори, проведені через певний інтервал часу, і використання гербарних, фондових, колекційних зразки лишайників, відібраних у більш-менш віддаленому минулому. Досвід проведення «історичних» БГХЛ-досліджень у світі і в Україні свідчить, що метод є ефективним [1 - 6]. *Метою дослідження* є вивчення стану та динаміки атмогеохімічного поля на території дендропарку «Олександрія» та його околиць (м. Біла Церква Київської обл.). Інструментом дослідження є метод біогеохімічної ліхеноіндикації за показаннями вмісту мікро- та макроелементів в сланях епіфітних лишайників. Для встановлення причини формування і змін атмогеохімічного поля станом на 2009 і 2021 роки використаний факторний аналіз (а саме *метод головних компонент* з обертанням факторів *Varimax*).

2 МАТЕРІАЛ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Слані епіфітних листуватих *Parmelia sulcata* Tayl., *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. та кущового *Evernia prunastri* (L.) Ach. – одні з найпопулярніших в системі БГХЛ-індикації, були відібрані з інтервалом у 12 років на території дендропарку «Олександрія» та в його найближчих міських околицях. Перший пробовідбір мав місце в липні 2009-го року, другий – в липні 2021-го року. Погодні умови під час обох пробовідборів були однаковими: тепло, сонячно, короткочасні дощі, помірна вітрова активність.

Лишайники, так само, як й інші рослини, мають видову специфічність щодо поглинання і акумуляції хімічних елементів [7]. Оскільки не у всіх точках пробовідбору і 2009-го і 2021 років зустрічалися одні і ті ж самі види лишайників, а величини концентрацій хімічних елементів у сланях лишайників різних видів між собою порівнювати не можна, це спонукало нас застосовувати так званий біогеохімічний лихеноіндикаційний показник (БГХЛ-показник) [8]. Він дозволяє коректно порівнювати між собою концентрації хімічних елементів в лишайниках різних видів із різних точок пробовідбору.

Загалом на одну й ту ж саму територію («дендропарк – прилеглі вулиці міста») в 2009 році ми мали 20 точок пробовідбору, а в 2021 році – 23. Різниця у 3 точок не є принциповою. Точки пробовідбору 2009 і 2021 років не завжди на 100% співпадали між собою, випадків повного співпадіння – близько чверті від загального числа точок. Але і великих просторових та ландшафтних відмінностей між розташуванням точок 2009-го і 2021 років не було. Неспівпадіння у розташуванні точок пробовідбору в 2009 і 2021 роках частково були обумовлені об'єктивними обставинами: за 12 років деякі дерева і чагарники – форофіти лишайників були вирубані, або всохли. Натомість в інших пунктах підросли інші і на їхніх стовбурах сформувалися придатні для пробовідбору лихеносинузії.

Відібрані зразки лишайників піддавали переданалітичній обробці (очищення, озолювання, розчинення у кислоті та ін.), а потім вивчали їх на вміст макро- і мікроелементів – K, Ca, Al, Fe, Mg, Na, Mn, Zn, Sr, Ti, Ba, Cu, B, Pb, Ni, V, Cr, Co, Cd, Sb методом плазмової емісійної спектроскопії (плазмовий спектрофотометр ICAP 6300 Duo виробництва Thermo Fisher Scientific Corporation, США).

Бази даних для подальшого геостатистичного вивчення й часового порівняння представлялися не у вигляді концентрацій хімічних елементів в сланях лишайників тих чи інших видів, а у вигляді БГХЛ-показника. Він обраховувався окремо для кожного елементу і для кожної точки пробовідбору в мікрограмах на грам повітряно-

сухої ваги зразка (мкг/г або $n \cdot 10^{-4}$ %) наступним чином: а) як фактичний вміст (Р) хімічних елементів в слані лишайника *P.sulcata* ($^{P}C_{P.sulcata}$, мкг/г); б) як гіпотетичний вміст (Г) хімічного елементу в лишайнику *P.sulcata* ($^{Г}C_{P.sulcata}$, мкг/г), обрахований за його реальною концентрацією в лишайнику *X.parietina* та/або *E.prunastri* ($^{P}C_{інш.вид}$, мкг/г); в) як середнє арифметичне між «а» і «б», або лише між «б» – якщо розрахунок робився по виконувався за вмістам хімічних елементів і в *X.parietina* і в *E.prunastri*. Результат «б» отримується шляхом перерахунку за визначеними заздалегідь або рівняннями регресії: $^{Г}C_{P.sulcata} = f(^{P}C_{інш.вид})$, або коефіцієнтами k: $^{Г}C_{P.sulcata} = k \cdot {}^{P}C_{інш.вид}$ [8] (рис. 1).

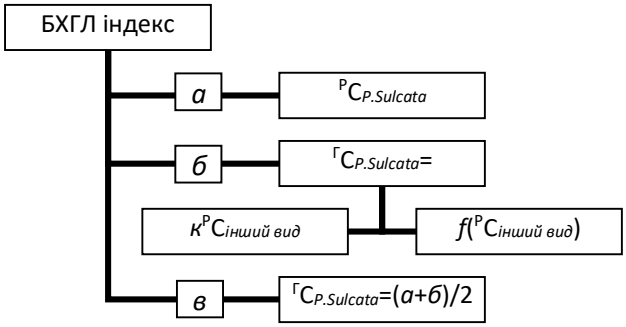


Рис. 1 – Формування БХГЛ-індексу (інший вид=*X.parietina* або *E.prunastri*)
Fig. 1– Formation of the BHGL-index

Аналіз і моделювання баз даних БГХЛ-показників за 2009 і 2021 роки проводилися за допомогою факторного аналізу.

3 ЕМПІРИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИЧИН ФОРМУВАННЯ І СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Дендропарк «Олександрія» представлений великими парковими і лісопарковими масивами на північно-західній околиці міста Біла Церква в межах заплави, надзаплавних терас і корінного схилу долини річки Рось з виходом на рівнинний плакор. Від плакору до річки простягаються гарно вироблені стабілізовані балки, зі ставками, без ознак сучасної ерозії. Геоморфологічні умови складні і різноманітні, що, безумовно, відбивається на міграції повітряних мас в межах території парку. Насадження різновікові, різного бонітету, габітусу, густини, ярусності, видового складу – це також створює різні умови для міграції повітряних мас.

Найбільш загальним чинником, що обумовлює пило-аерозольне навантаження на екосистеми парку, є природний теригенний пилопідйом. За дванадцятиріччя 2009-2021 рр. він навряд чи зазнав суттєвих трансформацій. Натомість природні чинники, пов'язані з вологістю атмосфери і температурою повітря з 2009 по 2021 роки змінилися помітно. Як ці зміни вплинули на міграцію хімічних елементів у парогазовій й рідкій фазах атмосферних забруднювачів, а також на фізіологічні механізми поглинання хімічних елементів лишайниками, ясно ще не до кінця, але наявність такого впливу є безперечним. Загальні кліматичні зміни спричиняють локальні мікрокліматичні трансформації умов міграції і седиментації пило-аерозолів на різних ділянках парку «Олександрія». Зокрема, вони відбилися на такому явищі міської кліматології, як «міський бриз». Воно є дуже важливим для формування атмосферного забруднення значних зелених масивів, розташованих по периферіях великих міст. «Міський бриз» – це циркуляція повітряних мас бризового типу між більш нагрітою кам'янистою поверхнею міста і прохолоднішою діяльною поверхнею оточуючих місто лісових, лісопаркових масивів. Наші БГХЛ-дослідження території лісопарку «Феофанія», розташованого на околиці Києва, показали важливість чинника «морський бриз» у формуванні забруднення лісовкритих периферійних приміських ділянок [9]. Техногенні пило-аерозолі насичують повітряну масу, що формується в центральній частині міста і в його промзонах. Забруднена повітряна маса піднімається вгору і у верхніх шарах приземної атмосфери рухається до міської периферії. Над прохолоднішою лісо вкритою приміською територією вона опускається, залишаючи в тамтешніх лісах і лісопарках всі ті техногенні пило-аерозолі, якими повітря наситилося над кам'янистою урбанізованою ділянкою. В результаті, не маючи власних джерел атмосферного забруднення, приміські лісовкриті території зазнають неабиякого атмотехногенного впливу.

Щодо техногенної складової пилогазових викидів і їхньої повітряної міграції, то дванадцятирічні зміни уявляються нам важливими. Біла Церква є крупним промисловим центром України. Тут розвинуте виробництво автомобільних шин, накладок і гальмівних колодок; енергетичне, електротехнічне, лісогосподарське, сільськогосподарське машинобудування, а також приладобудування; ремонтно-механічні виробництва; фармакологічна промисловість; поліграфія;

виробництво спецодягу і взуття; харчова промисловість; функціонує потужна теплоелектростанція. Розвинуті будіндустрія і видобування будівельного, декоративного каменю. З 2009 р. місто поступово насичувалося автомобільним транспортом, розбудовувалося. Зміни у виробничій активності відбувалися по-різному, одні джерела техногенного впливу згасали (деякі підприємства зменшили, а то й припинили виробництво), інші розширювалися або навіть утворювалися нові (наприклад, виникли нові електротехнічні і фармакологічні підприємства). В сумі все це формувало доволі строкату картину атмотехногенного впливу на довкілля Білої Церкви і її околиць.

Специфічним для парку «Олександрія» був вплив сильної техногенної аварії, що мала місце в безпосередній близькості від нього, і передумови якої формувалися багато років. Аварійну ситуацію спровокували військовий аеродром – забруднення нафтопродуктами і гальванічний цех авіаремонтного заводу – забруднення важкими металами, особливо сполуками шестивалентного хрому. Скиди с/г підприємства «Агрохімоб'єднання» і селекційної станції, розташованих на північ недалеко від парку, є найвірогіднішими джерелами амонійного, нітратного і нітритного забруднення. Ознаки серйозної аварійної ситуації виявили на початку 1990-х рр. і надалі локальний техногенно-геохімічний вплив швидко наростав, досягнувши у другій половині 1990-х максимуму [10]. Потім він почав зменшуватися, але 2009 р. – рік першого нашого пробовідбору все ж таки був роком значного, обумовленого цією аварією, локального техногенно-геохімічного впливу на екосистеми «Олександрії». Аварійна ситуація завдала шкоди, в першу чергу, не повітрю, а підземним і поверхневим водам, грунтам і четвертинним відкладам. Але оскільки забруднення геологічного середовища відбувалося тривалий час, воно не могло на відбитися і на стані рослинного покриву, включаючи і лихенофлору. У всякому разі дослідження співробітників дендропарку «Олександрія» чітко встановили, що забруднення геологічного середовища відбилося на біохімічних, фізіологічних і біоценологічних показниках рослинного покриву (особливо лугового і водно-болотного) [10 - 12]. Також наші дослідження від 2009 р. показали, що в той рік забруднення грунтів і підземних вод мало певний вплив і на поглинання важких металів епіфітними лишайниками [13].

Аномальні БХГХ пункти пробовідбору 2009 року (рис. 2): №1, галявина в центрі парку, рівнина; №13, вирівняна ділянка перед початком силу центральної балки, галявина; №14, галявина в центрі парку, рівнина; №20, зарості клену середньої густини на корінному схилі Росі; №22, корінний берег Росі, борт старого гранітного кар'єру, стрільбище; №28, «Велика Галявина» з поодинокими елітними старими деревами; пункт №31, на розгалуженні стежок біля другого центрального входу; №33, галявина в північній частині парку, рівнина, біля другого входу в парк ~30 м до а/д; №36, галявина біля першого головного – «кутового» входу у парк, ~30 м до а/д; №38, верхня частина схилу центральної балки; №41, висока заплава Росі, паркові розріджені насадження біля «прирічкового» входу в парк; №44 заплава Росі.

Аномальні БХГХ пункти пробовідбору 2021 року: №1, ділянка «Нагірна Галявина»; №4, «Нова територія», урочище «Будинок лісника», колишній солдатський пляж; №7, «Нова територія», перпендикулярно Росі, над першою надзаплавною терасою; №12, зліва від адмінкорпусу; №13, висока заплава Росі, «острів» між каналом і Россю, біля колони «Чаша»; №20, третій вхід в парк, до міської автотраси ~5 м; №26, навпроти колонади «Луна» – 3562; №30, площа перед першим «кутовим» входом в дендропарк; №32, гирло великої (основної) балки, 50 м від «Руїн»; №36, висока заплава Росі, паркові розріджені насадження біля «прирічкового» входу в парк.

При порівнянні місць розташування найбільш забруднених пунктів в 2009 і 2021 роках, можна помітити, що вони не співпадають цілком. Зокрема, точка «стрільбище», котра в 2009 році ідентифікувалася як дуже забруднена по Pb, Sb і Mn (див. вище), в 2021 році перестала бути такою. Напевно це пов'язано із припиненням регулярного використання території біля цієї точки в якості стрільбища. Не мають аналогів в зборах 2021 року також точки від 2009 року, в яких спостерігалися високі вмісти Cr, що свідчить про зниження хромового забруднення в 2021 році. Водночас підвищені вмісти хімічних елементів у лишайниках, які ростуть на північній периферії дендропарку «Олександрія», котра примикає безпосередньо до міста, є характерними і для 2009 і для 2021 років.

Рис. 2 – Пункти пробовідбору, в яких спостерігалися максимальні величини БГХЛ-показника
Fig. 2 – Sampling points in which the maximum values of the BGHL indicator were observed

Таблиця 1 – Ряди нормованого на БГХЛ-показник (мкг/г) нагромадження хімічних елементів в лишайниках, відібраних в дендропарку «Олександрія» і на прилеглих до нього ділянках м. Біла Церква в 2009 і 2021 роках

Table 1 – The series of accumulation of chemical elements in lichens normalized to the BGHL-index (mcg/g) in the Arboretum "Olexandria" and in the adjacent areas of the city of Bila Tserkva in 2009 and 2021

2009																			
Ca	**K**	**Fe**	**Al**	**Mg**	**Na**	**Zn**	**Ti**	**Mn**	**Pb**	**Ba**	**Sr**	**Cu**	**B**	**Ni**	**V**	**Cr**	**Co**	**Sb**	**Cd**
7117	3843	1477	1306	965	107	83,9	78	62	26,1	20,6	16,4	10,2	7,9	4,7	2,6	1,96	0,8	0,37	0,34
2021																			
Ca	**K**	**Al**	**Fe**	**Mg**	**Na**	**Ti**	**Mn**	**Zn**	**Ba**	**Sr**	**Cu**	**B**	**Pb**	**Cr**	**V**	**Ni**	**Co**	**Cd**	**Sb**
6774	5108	1659	1644	1233	228	134	98	74	28	19,8	10,6	10,3	8,3	5,2	4,9	3,1	0,72	0,42	0,03

В табл. 1 подані нормовані на БГХЛ-показник ряди нагромадження хімічних елементів в лишайниках в цілому по дендропарку «Олександрія» та в його найближчих околицях за 2009 і 2021 роки. Порівняння цих рядів свідчить, що практично всі хімічні елементи в 2021 році поглиналася лишайниками з повітря або з більшою або з меншою інтенсивністю, аніж в 2009 році. Відносно сильна (більша, аніж в два рази) або навіть дуже сильна (більше, аніж в десять разів) зміна в інтенсивності нагромадження спостерігається для сурми (в 2021 році у порівнянні з 2009 роком середній БГХЛ-показник зменшився в 12,3 рази), для свинцю (в 2021 році середній БГХЛ-показник зменшився в 3,1 рази), для хрому (в 2021 році середній БГХЛ-показник збільшився в 2,7 рази), для натрію (в 2021 році БГХЛ-показник збільшився в 2,1 рази). Коливання за дванадцятиріччя вмісту в лишайниках інших хімічних елементів – в бік збільшення чи зменшення не перевищували двох крат, а вміст міді залишився майже незмінним. Порівняння рядів нагромадження вказує, що умови атмосферного забруднення і поглинання з повітря хімічних елементів лишайниками за 12 років – з 2009-го по 2021-й – зазнали більш або менш суттєвих змін. Що це за зміни і які причини їх обумовили, нам дозволять судити результати геостатистичного моделювання баз даних БГХЛ-показників методом факторного аналізу.

4 ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ БАЗ ДАНИХ БГХЛ-ІНДИКАЦІЇ

Факторний аналіз баз даних у біогеохімічній індикації привабливий тим, що в кінцевому підсумку дозволяє охарактеризувати не лише стан геохімічного поля, а й побачити, зрозуміти причини, котрі визначають просторово-функціональну структуру цього поля.

Досвід використання факторного аналізу для обробки БГХЛ-баз даних говорить про його результативність у БГХЛ-індикаційних дослідженнях стану забруднення довкілля. В роботі *Kuik R.* [14], виконаній з використанням лишайника P.sulcata, було показано, що чинники, які обумовлюють нагромадження хімічних елементів в зразках, відібраних на території Нідерландів, є такими: F_1 – теригенний пил; F_2 – морський аерозоль; F_3 – металургія; F_4 – галузі промисловості, що використовують цинк; F_5 – чинник невідомого походження, пов'язаний із використанням ртуті. Для Нідерландів же наводяться дані в роботі *Sloof J.E.* [3]. Вона важлива для нас тим, що в ній, так само як і в цій нашій роботі, подаються результати факторного аналізу баз даних (*P.sulcata*) за різні роки пробовідбору. Згідно результатам роботи, геохімічні асоціації хімічних елементів при коефіцієнтах факторних навантажень 0,6 і більше, у різні роки пробовідбору суттєво змінюються, а саме. По F_1 в 1982/1983 індикативна асоціація хімічних елементів була такою: Sc/La/V/Th/Al/Cr/Fe/Ni/Co/As/Se/Sb, а в 1986/1987 – Th/Sc/Cs/Al. По F_2 в 1982/1983 роках вона була такою: Sc Zn/Cd, а в 1986/1987 – Zn/As/Cr. По F_3 в 1982/1983 – Br (моноасоціація), а в 1986/1987 – Ni/V/Fe. По F_4 в 1982/1983 – Cs, а в 1986/1987 – Cd; по F_5 в 1982/1983 – Hg/Se, а в 1986/1987 – Br; по F_6 в 1982/1983 – Mn, а в 1986/1987 – Hg. Запропоновано наступну інтерпретацію факторів. 1982/1983 роки: F_1 – теригенний пил; F_2 – викиди металургії цинку і електронної промисловості; F_3 – спалювання вугілля; F_4 – знову теригенний пил; F_5 і F_6 – достеменно не інтерпретовані. 1986/1987 роки: F_1 і F_2 – аналогічно відбору 1982/1983; F_3 – спалювання нафтопродуктів; викиди металургії цинку і електронної промисловості; F_4 – чорна металургія; F_5 – спалювання вугілля; F_6 – достеменно не інтерпретований. В статті *Jeran Z.* [15] наводяться результати обробки баз даних концентрацій хімічних елементів в сланях лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., відібраних на території Словенії. Чинники з першого по дев'ятий автори інтерпретують так: F_1 і F_7 – теригенний пил; F_2 і F_4 – викиди чорної металургії; F_3 – вплив морських аерозолів і дощових атмосферних опадів; F_5 – вплив деяких хімічних особливостей атмосферних опадів (здатність до утворення нерозчинних сполук); F_6 – вплив викидів транспорту; F_8 – спалювання вугілля; F_9 – вплив регіонального переносу забруднених повітряних мас. Цей же лишайник – *H.physodes* був використаний для вивчення забруднення повітря навколо мідного рудника «Бучим» у Північній Македонії [16]. F_1, що утворює асоціацію Al/Cr/Fe/Li/V, інтерпретується як вплив теригенного пилу. F_2, визначений асоціацією Ca/Cd/K/Zn, також вважається «геогенним чинником», але с «поправкою» на біогенність Ca, K і Zn (щодо Cd, то він, маючи гарну розчинність і проникність крізь біологічні мембрані, здатен мігрувати і накопичуватися в рослинах подібно до біогенів,

хоча за своїми біохімічними властивостями є токсикантом [17]. Фактор-3 з асоціацією Ni/Sr автори також вважають «природним» і «геогенним», але виразного тлумачення йому не дають. І лише F_4, представлений асоціацією Cu/Pb рахується чинником техногенного впливу, обумовленого гірничо-видобувними і гірничо-збагачувальними процесами, що мають місце на мідному руднику. В роботі Василєвіча М.І. та ін. [18] наводяться результати факторного аналізу БД вмісту хімічних елементів в лишайниках родів *Usnea* і *Bryoria*, відібраних у тайзі Кольського півострова (Росія). Фактори інтерпретуються так: F_1 – теригенний пил; F_2 – біогеохімічні механізми поглинання хімічних елементів лишайниками; F_3 – F_6 –локальні природні геохімічні особливості екосистем. В роботі [19] за допомогою факторного аналізу було показано, що вміст хімічних елементів в лишайнику *X.parietina* з Туреччини обумовлюється такими чинниками як загальний вплив міського середовища, викиди транспорту, спалювання вугілля, розвіювання забрудненого грунту і біогеохімічні закономірності поглинання лишайниками хімічних елементів (фактор біогенезу).

Таблиця 2 – Результати факторного аналізу баз даних БГХЛ-показників, отриманих в 2009 (чисельник) і в 2021 (знаменник) роках, для території дендропарку «Олександрія» і прилеглих ділянок (Київська обл.)

Table 2 – The results of the factor analysis of the databases of BGHL-index obtained in 2009 (numerator) and in 2021 (denominator) for the territory of the Arboretum "Olexandria" and adjacent areas (Kyiv region)

Хімічний елемент	Рік пробовідбору	Коефіцієнти факторних навантажень					
		F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
Ca	2009	0,117	**0,855**	0,084	–0,039	–0,037	0,225
	2021	0,123	**0,890**	–0,063	–0,024	0,029	–0,088
K	2009	–0,236	–0,168	0,059	**0,823**	0,237	0,180
	2021	0,258	0,015	–0,480	–0,027	–0,046	**–0,733**
Al	2009	**0,905**	0,023	–0,140	–0,090	0,156	0,190
	2021	**0,943**	0,084	–0,012	0,223	0,137	0,141
Fe	2009	**0,794**	0,090	–0,137	0,435	0,046	0,202
	2021	**0,900**	0,042	–0,008	0,319	0,196	0,179
Mg	2009	–0,120	0,552	–0,121	**0,707**	–0,101	–0,132
	2021	0,165	0,393	0,104	–0,162	**0,637**	0,128
Na	2009	–0,053	–0,096	0,005	0,077	**0,930**	0,190
	2021	**0,905**	0,158	–0,128	0,054	0,111	–0,083
Ti	2009	0,325	–0,075	–0,152	0,410	0,254	**0,689**
	2021	0,526	0,064	0,149	**0,827**	–0,021	0,021
Mn	2009	–0,197	–0,280	**0,690**	0,043	0,153	0,313
	2021	–0,055	0,104	**–0,925**	0,038	–0,186	–0,099
Zn	2009	0,300	–0,025	0,060	**0,800**	0,016	0,173
	2021	0,313	0,305	0,220	0,515	0,148	0,458
Ba	2009	0,056	0,256	0,265	0,067	0,087	**0,853**
	2021	**0,704**	0,240	–0,041	0,265	0,132	–0,285
Sr	2009	–0,001	**0,925**	0,007	0,113	–0,197	–0,003
	2021	0,297	**0,932**	0,036	0,056	0,201	0,065
Cu	2009	0,468	–0,057	0,292	0,350	–0,288	0,430
	2021	0,246	–0,134	0,186	0,238	**0,861**	0,121
B	2009	–0,203	0,425	–0,397	–0,069	0,241	–0,180
	2021	–0,217	0,257	0,124	–0,037	–0,187	–0,489
Pb	2009	0,090	0,044	**0,819**	–0,042	0,166	–0,182
	2021	**0,684**	0,133	0,004	0,590	0,139	0,035
Cr	2009	0,347	0,104	0,044	**0,631**	0,119	0,480
	2021	**0,768**	0,056	0,152	0,545	–0,037	–0,095
V	2009	0,276	0,276	0,014	**0,639**	0,028	0,389
	2021	**0,637**	–0,108	0,149	**0,638**	–0,002	0,182
Ni	2009	0,311	–0,045	–0,107	0,395	0,233	**0,752**
	2021	0,167	0,183	–0,171	**0,806**	0,012	0,047
Co	2009	0,411	–0,153	0,075	0,185	**0,802**	0,139
	2021	**0,774**	–0,058	0,132	0,232	0,364	0,180

Таблиця 2 – Продовження
Table 2 – Continued

Хімічний елемент	Рік пробовідбору	Коефіцієнти факторних навантажень					
		F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
Cd	2009	0,122	0,463	0,515	0,283	–0,323	0,328
	2021	–0,097	**0,731**	–0,103	0,200	–0,137	–0,128
Sb	2009	–0,248	0,142	**0,713**	–0,019	–0,144	0,033
	2021	0,310	–0,181	–0,173	0,478	0,300	–0,109
V	2009	30,9	15,4	12,4	8,7	7,4	4,9
	2021	42,5	13,5	10,2	7,4	4,2	3,4

В табл. 2 подані результати факторного аналізу баз даних БГХЛ-показників від 2009 (чисельник, фактори «F^{2009}») і від 2021 (знаменник, фактори «F^{2021}») року. Інтерпретація результатів факторного аналізу, коефіцієнтів факторних навантажень (КФН) і величин поясненої дисперсії, дозволило нам зробити висновки про природу визначальних геохімічних чинників і силу їхнього впливу Факторний аналіз в геохімічних дослідженнях набув широкого вжитку, інтерпретація факторів формування геохімічних асоціацій чіткого й однозначного алгоритму не має. В значній мірі вона є творчим процесом. Оскільки модель має ймовірнісно-статистичну природу, то інтерпретація об'єктивно сильно залежить від конкретних геохімічних умов і явищ, які в природі є дуже різноманітними; а суб'єктивно – спирається на ерудицію, інтуїцію, геохімічне мислення, і експериментально-польовий досвід дослідника-інтерпретатора. Втім існують і певні загальні правила, яких слід дотримуватися при інтерпретації результатів факторного аналізу

Насамперед, важливо визначитися який рівень статистичної значимості коефіцієнтів факторних навантажень слід брати до уваги, а які необхідно ігнорувати. В загальному випадку це залежить від потужності вибірки та ступенями свободи. Дослідники оперують різними рівнями значущості КФН: одні не приймають до уваги КФН із значеннями , не меншими від 0,8 [3]; інші опускають планку рівня значущості до значень 0,4 (для мохів) [20]. Але зазначені величини рівня значущості КФН – крайнощі в інтерпретаційні моделі. У першому випадку відчутно обмежуються можливості формування інформативно повноцінних асоціацій хімічних елементів за відповідними факторами. У другому - навпаки, робить їх (асоціації) дуже великими, «всеосяжними» і такими, що інтерпретуються з малими ймовірностями. Більшість дослідників обирає «золоту середину» і за нижню («інтерпретативну») межу приймає величини КФН в інтервалі від 0,6 до 0,7. Ми вважаємо такий підхід оптимальним, допускаючи, що значення КФН в інтервалі 0,6 – 0,7 для інтерпретації є в певному сенсі недостатньо інформативними (хімічні елементи з такими значеннями КФН будемо брати в асоціаціях у квадратні дужки).

Другий момент, який обов'язково слід враховувати при інтерпретаціях геохімічних асоціацій по відповідним факторам їх формування, полягає в тому, що серед достеменних значень КФН присутні величини як зі знаком «плюс», так і з позначкою «мінус». Знак «плюс» перед КФН свідчить, що цей фактор обумовлює накопичення даного елементу у слані лишайника; а значення КФН зі знаком «мінус» говорить про те, що мають місце процеси деконцентрації (вимивання, вилуговування) хімічного елементу зі слань.

Оскільки нам доведеться порівнювати між собою значення для КФН для кожного хімічного елементу за різні роки – 2009-й і 2021-й – то може виникнути і виникає ситуація, коли за один рік КФН інтерпретується (його значення дорівнює 0,6 і вище, а за інший – ні: КФН < 0,6). В такому разі про рік з КФН < 0,6 говоритимемо, що по даному фактору для даного елементу ніяких певних закономірностей не спостерігається. Але самі факти «не спостерігається» (КФН < 0,6) і «спостерігається» (КФН > 0,6) для потреб інтерпретації порівнювати можна і слід. Інший «тонкий» випадок – значення КФН в обох роках перевищують поріг інтерпретації – 0,6, але в одному році вони мають «+», в іншому – «–». В такому випадку говоримо, що дія геохімічного чинника змінюється на протилежну, тобто накопичення хімічного елементу у сланях змінюється на його вилуговування (виніс), або ж навпаки.

Враховуючи зроблені зауваження, перейдемо до інтерпретації і обговорення даних табл. 2.

5 ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ

Фактор-1. В 2009 році під впливом F_1^{2009} була сформована геохімічна асоціація Al(0,905)/Fe(0,794), а в 2021 році – під дією фактору F_1^{2021} утворилася асоціація Al(0,943)/Na(0,905)/Fe(0,900)/Co(0,774)/Cr(0,768) /Ba(0,704)/[Pb(0,684) /V(0,637)]. В літературі вплив першого фактору звичайно пов'язується або з загально-пиловим навантаженням на атмосферу, або – більш обмежено – з теригенними пиловим навантаженням, причому провідну роль в обох випадках відводять крупнодисперсним часточкам. Теригенно-пилове навантаження на атмосферу більше властиве об'єктам, що оточені територіями з розвинутою сільськогосподарською або гірничопромисловою діяльністю. Для теригенно-пилового навантаження характері хімічні елементи, які входять до складу природних мінералів, зокрема – в нашому випадку – алюміній, залізо. В меншій мірі природним мінералам властиві також натрій, хром і барій. Останні два елементи є також характерними складовими техногенезу, а крім них, що для нашого об'єкту є важливим, техногенезові властиві Co, Pb і V. Тобто загально-пилове навантаження при провідній ролі теригенних часточок (Al, Fe), визначається також продуктами техногенезу. Раніше нами було показано, що для умов Білої Церкви характерною є атмогеохімічна асоціація Al/Fe/V причому останній має теплоенергетичне походження і також тяжіє до крупнодисперсних часточок. Було також встановлено, що загально-пилове навантаження на дендропарк «Олександрія», який примикає до крупного міста, у великій мірі обумовлюється явищем міського бризу [13]. Якщо в 2009 році по першому чиннику ми мали справу лише з асоціацією Al/Fe, котра відбиває вплив переважно теригенного пилу, то в 2021 році до неї «примішалася» велика кількість інших хімічних елементів. Крім того, по першому чиннику в 2021 році у порівнянні з 2009-м на 11% зріс відсоток вичерпаної дисперсії. Все це вказує на зростання ролі техногенезу у формуванні загальної атмогеохімічної обстановки у місті Білій Церкві і дендропарку «Олександрія», що викликалось перебудовою промислово-господарського комплексу міста в друге десятиріччя XXI ст. з відповідними трансформаціями у кількості та складові повітряних викидів. Схожі висновки раніше були отримані нами раніше і для території, що оточена переважно галузевими чинниками агрогенезу, для дендропарку «Асканія-Нова».

Фактор-2. Геохімічною асоціації по F_2^{2009} є Sr(0,925)/Ca(0,855), а по F_2^{2021} – Sr(0,932)/Ca(0,890)/Cd(0,731). Асоціація Sr/Ca досить легко інтерпретується, якщо припустити, що вона пов'язана з пило-аерозолями, утвореними в процесі виробництва і використання будівельних матеріалів. З кальцієм і стронцієм все більш менш зрозуміло: ці хімічні елементи, пов'язані здебільшого з крупнодисперсними часточками, є невід'ємною складовою карбонатних субстанцій, з яких виробляються будматеріали (Sr, нагадаємо, є хімічним аналогом Ca і завше «супроводжує» його як домішка в різних мінералах, речовинах, субстанціях). А от на потужний зв'язок з виробництвом будматеріалів кадмію вказують лише окремі, але цілком авторитетні, автори, як от Ю.Є. Саєт зі співавторами [21]. Поява кадмію в асоціації саме 2021 року є логічною, оскільки в 2008 році була закінчена повна реконструкція потужного білоцерківського заводу з виробництва цегли, в т.ч. клінкерної. То ж повністю його екогеохімічний вплив на атмосферне повітря зміг проявитися саме у період між пробовідборами, тобто з 2009 по 2021 роки.

Якщо дію фактору-2 характеризувати в самих загальних рисах, то його можна визначити, як техногенний вплив на територію «Олександрії» ззовні – з боку міста. Очевидно, якщо відбувається перенос на територію парку крупнодисперсних аерозолів техногенного походження з міських площ, то тут має включатися якийсь потужний механізм повітряного переносу від міста до лісовкритої території: таким, як підкреслювалося, є міський бриз.

Інтерпретація факторів $F_{(3\text{-}6)}^{2009}$ і $F_{(3\text{-}6)}^{2021}$ сильно ускладнюється тим, що в асоціаціях 2009 і 2021 років по одним і тим же самим геохімічним факторам впливу на довкілля майже немає спільних хімічних елементів-маркерів (за виключенням марганцю з протилежними знаками для фактору-3 і ванадію для фактору-4 із мало інформативними значеннями КФН – в інтервалі 0,6 – 0,7). Але уже з факту самої цієї невідповідності асоціацій по $F_{(3\text{-}6)}^{2009}$ асоціаціям по $F_{(3\text{-}6)}^{2021}$ можна зробити цілком логічний висновок, що з 2009 по 2021 роки у «факторній

зоні» від 3-го до 6-го чинників відбувалися суттєві зміни щодо геохімічної обстановки на території «Олександрії».

Фактор-3. F_3^{2009} утворює асоціацію Pb(0,819)/Sb(0,713)/[Mn(0,690)], а F_3^{2021} – моноасоціацію Mn(–0,925). Спілка Pb/Sb/Mn з великою вірогідністю маркує потужний локальний вплив стрільбища. Pb і Sb характерні для сплавів, з яких виготовляють кулі, а Mn входить до складу деяких порохів. Максимальні вмісти цих хімічних елементів у пробах 2009 року спостерігалися саме в точці № 22 «Стрільбище» (див. вище). В 2000-х роках стрільбище функціонувало регулярно, в 2010-х – ні. Тому асоціація Pb/Sb/Mn у провідборі за 2021 рік і зникла. Марганець повів себе взагалі дивно, він «обернув» фактор-3 на свою протилежність (знак перед КФН змінився з «+» на «–»). Це може означати, що в локальному місці дії такого специфічного і водночас потужного фактору, як «стрільбище», не просто зменшилося атмосферне навантаження по марганцю і він перестав накопичуватися в лишайниках, марганець почав вимиватися з лишайників, деконцентруватися. Останнє нам представляється можливим, оскільки, як відомо, міграція, накопичення, вилуговування Mn дуже чутливі до найменших змін Eh та pH параметрів середовища, в т.ч. атмосферних опадів і гідрометеорів, якими, з одного боку, важкі метали постачаються у слані лишайників, а з іншого – вилуговуються зі слань. Вимивання марганцю напевно пов'язане, по-перше, з припиненням впливу порохових газів, що формують лужне середовище, в якому Mn малорухомий і відповідно краще накопичується. По-друге, у зв'язку із зникненням чи послабленням фактору «стрільбище», яким створювалася лужна обстановка (причому безпосередньо в атмосфері), в «свої права» вступили кислі опади, котрі є характерними для міських територій, особливо таких, де розміщуються потужні ТЕС. Вірогідно саме вони змінили показники Eh та pH опадів і гідрометеорів таким чином, що Mn став рухомішим і почав вимиватися зі слань лишайників.

Таким чином фактор-3 в загальному випадку можна визначити як фактор потужного локального атмотехногенного впливу. На його потужність вказує і відсоток пояснюваної дисперсії – V_3^{2009}=12,4 й V_3^{2021}=10,2. В конкретному ж випадку цим фактором локального техногенного впливу виявився чинник, пов'язаний зі стрільбищем в 2009 р., який змінився на чинник «ТЕС – кислі опади» в 2021 році.

В інших випадках, фактори четвертий, п'ятий і шостий теж проявляють себе як локальні чинники техногенної природи, але вже меншої потужності та іншого походження. При за величинами поясненої дисперсії (табл. 2) помітно, що потужність дії локальних для території «Олександрії» техногенних геохімічних чинників в 2021 році за всіма факторами зменшується у порівнянні з 2009 р. Таку зміну геохімічної обстановки логічно пояснити дією процесів самоочищення екосистем дендропарку, забруднених техногенною катастрофою 1990-х років. Але в кожному окремому випадку інтерпретація геохімічних чинників конкретизується з трудом. Асоціації по $F_{(4\text{-}6)}^{2009}$ і $F_{(4\text{-}6)}^{2021}$, тобто по 2009 і 2021 рокам для кожного чинника з четвертого по шостий є дуже різними. Тим не менш дозволимо зробити собі такі припущення щодо інтерпретації цих факторів впливу.

Фактор-4. Геохімічною асоціацією по F_4^{2009} є K(0,823)/Zn(0,800)/Mg(0,707)/ [V(0,638)/Cr(0,631)], а по F_4^{2021} – Ti(0,827)/Ni(0,806)/[V(0,638)]. Обидві асоціації, хоча вони і мало схожі між собою ми інтерпретуємо як вплив на ландшафти «Олександрії» екологічної катастрофи 1990-х років. Але в 2009 і в 2021 році цей вплив мав помітні відміни. В 2009-му він (F_4^{2009}) був більш комплексним і формувався, згідно даних Л.Я. Плескач [10, 22], з причини проникнення у геологічне середовище нафтопродуктів і відходів гальванічного виробництва, а також скидів агропідприємств (див. вище). Маркером забруднення нафтопродуктами по F_4^{2009} є ванадій (на нього як на маркер забруднення геологічного і водного середовища нафтопродуктами вказується в [23]. Маркерами гальванічних відходів – Zn, Mg, Cr; а калій, як неодмінний компонент міндобрив, швидше за все, пов'язаний із впливом на оточуюче середовище агровиробництв. За дванадцятиріччя відбувалося самоочищення екосистем «Олександрії», водночас проводилися заходи з очищення грунтів і грунтових вод. Вплив відходів гальваніки і агровиробництв (котрі представлені здебільшого гарно розчинними у воді сполуками) зменшився сильніше, аніж вплив нафтопродуктів, забруднення якими гірше піддається ліквідації. То ж величина КФН по F_4^{2021} для ванадію – індикаторові забруднення паливно-мастильними матеріалами – залишилася незмінною. До асоціації індикаторів

нафтопродуктового забруднення додався нікель, який також є гарним маркером цього типу забруднення довкілля [23]. Роль титану не зовсім ясна, можливо його попадання у нафтопродукти пов'язане із широким використанням у нафтопереробці і нафтохімії титанових ємностей і труб (з яких у нафтопродукти так чи інакше, але продукти корозії титану потрапляють).

Не з'ясованим залишається механізм впливу забрудненого геологічного і водного середовища ландшафту «Олександрії» на приземний шар атмосфери, забруднення якого саме БГХЛ-індикацією і уловлюється. Раніше нами було показано, що в 2009 р. біогеогеохімічні індикаційні параметри щодо забруднення, з одного боку підземних/поверхневих вод і грунтів, з іншого – приземного шару повітря «Олександрії», мали як спільні риси, так і суттєві відміни. Напевно вони залишилися і в 2021 р., хоча, не менш таки певно, що зазнали і трансформацій. Але зв'язок між цими двома формами забруднення екосистем, безумовно, мав місце, як тоді, так і зараз. Зокрема в локальному масштабі забруднені грунти цілком можуть впливати на приземний шар повітря через механізм пилопідйому, а забрудненні водойми і водотоки – через механізм формування туманів випаровування і гідрометеорів (роса, паморозь). Ці питання вимагають ретельного вивчення.

Фактори 5-й і 6-й, самі по собі не потужні (згідно величинам відсотку поясненої дисперсії V), за силою впливу на атмогеохімічну обстановку «Олександрії» на протязі вивченого дванадцятиріччя продовжили зменшуватися: по фактору-5 – від V_3^{2009}=7,4 до V_5^{2021}=4,2; по фактору-6 – від V_6^{2009}=3,4 до V_6^{2009}=4,9 (табл. 2). Водночас відбувалися суттєві, якщо не сказати кардинальні, трансформації геохімічних асоціацій, утворюваних за V_5^{2009} – V_6^{2009} і V_5^{2021} – V_6^{2021}, а саме: Na(0,930)/Co(0,802)2009 → 2021Cu(0,861)/[Mg(0,637)] за фактором-5, і Ba(0,853)/Ni(0,752)/[Ti(0,689)]2009 → 2021K(–0,733) за фактором-6. Як бачимо, між асоціаціями 2009-го і 2021-го рр. нічого спільного немає (між F_4^{2009} та F_4^{2021} спільним був хоча б ванадій). Ми схильні пояснювати це тим, що в дванадцятиріччя між пробовідборами відбувалася важлива перебудова геохімічної обстановки на території «Олександрії», пов'язана, насамперед, з процесами самоочищення екосистем (активна рекультиваційна діяльність на той час послабшала).

Фактор-5, з нашої точки зору, слід інтерпретувати як навантаження на довкілля виключно «гальванічного» забруднення. Але за 12 років воно зазнало змін: кобальт – один з найтиповіших маркерів гальванічного забруднення, в 2021 році «змінився» на мідь – важкий метал, що теж, як геохімічний індикатор, властивий гальванічним відходам, але в меншій мірі, аніж кобальт. Ролі натрію і магнію залишаються загадковими, можливо достеменні величини КФН для цих хімічних елементів також є показниками якихось посткатастрофічних геохімічних трансформації в екосистемах «Олександрії». Питання вимагає подальшого дослідження.

Фактор-6 будемо вважати фактором впливу на екосистеми «Олександрії» суто нафтопродуктового забруднення. Для ситуації 2009 року про це свідчать нікель і титан, котрі за F_4^{2021} ми також зв'язали із забрудненням парку паливно-мастильними матеріалами (див. вище). А от значення КФН по калію в –0,73 є дуже нетривіальною «вказівкою на нафтопродуктове забруднення екосистеми «Олександрії». Відомо, що рухомість К (а калій – один із самих рухомих у довкіллі хімічних елементів), а значить і його поглинання, в середовищі і біологічних об'єктах, забруднених нафтопродуктами, знижується [17, 23]. Не виключено, що КФН для калію по Ф6 вказує нам саме на це біогеохімічне явище. З одного боку, зниження вмісту калію у сланях лишайників вказує свідчить про наявність залишкового нафтопродуктового забруднення екосистем «Олександрії»; з іншого – вказує на те, що Ф6 є чинником біогеохімічної і біохімічної природи, від якого залежить сорбція і десорбція рослинними організмами біогенного хімічного елементу – калію.

Якщо фактори 5 й 6 розглядати лише як дію поставарійних форм техногенезу, то для них справедливим є все те, що сказано про механізми дії фактора-4 щодо впливу забруднення геологічного і водного середовища на приземну атмосферу. Зазначимо також, що, з геохімічної точки зору, фактори-5 і -6 можна розглядати як своєрідне роздвоєння або розчеплення на окремі складові більш потужного чинника комплексної дії. Такі «геохімічні розчеплення» потужних комплексних чинників на менш потужні і більш фрагментовані у просторі «підчинники» (як природного так і техногенного походження) є явищем досить звичайним і неодноразово фіксувалися різними способами геостатистичного моделювання даних біогеохімічних – не тільки БГХЛ- –

індикаційних дослідженнях оточуючого середовища.

На завершення обговорення результатів геостатистичного моделювання за допомогою факторного аналізу слід підкреслити наступне: фактори-1 і -2 – це переважно важливі регіональні атмогеохімічні чинники, що впливають на екосистеми і ландшафти «Олександрії» в цілому (тобто в межах всього парку). Фактор-3 – атмогеохімічний чинник, який завдає шкоди паркові дуже вибірково; відносно потужний, але локальний (і доволі своєрідний) фактор впливу. В 2021 році його роль згасла. Фактори-5 і -6 – теж локальні чинники: вони впливають на парк лише в окремих місцях, а не у всій його площині (при цьому, згасаючи від 2009-го до 2021-го рр.). При цьому вони є вже не власне атмотехногенними чинниками, а літогенними і гідрогенними, забезпечуючи свій вплив на приземний шар повітря «Олександрії» через систему міжкомпонентних внутрішньо-ландшафтних геохімічних зв'язків – насамперед, шляхом вузько-локального пилового підйому і через механізми мікрокліматичної конденсації над поверхнями водойм і тимчасово або постійно перезволоженого грунтово-рослинного покриву.

6 ВИСНОВКИ

Методом біогеохімічної ліхеноіндикації із використанням епіфітних листуватих (*Parmelia sulcata Tayl*., *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.) та кущового (*Evernia prunastri* (L.) Ach.) лишайників було оцінено рівні середнього багаторічного вмісту K, Ca, Al, Fe, Mg, Na, Mn, Zn, Sr, Ti, Ba, Cu, B, Pb, Ni, V, Cr, Co, Cd, Se, Sb у приземному повітрі на території дендропарку «Олександрія» і деяких прилеглих до нього ділянках міста Біла Церква Київської обл. в 2009 (20 пунктів пробовідбору) і 2021 (23 пункти) роках. Бази даних величин біогеохімічного ліхеноіндикаційного показника окремо по пробовідборам 2009 і 2021 років було проаналізовано емпірично, а також оброблено за допомогою факторного аналізу. Виявлені ділянки дендропарку із найбільш забрудненим приземним шаром атмосфери, показана динаміка змін стану забруднення атмосфери «Олександрії» з 2009 по 2021 роки. За допомогою моделювання баз даних величин БГХЛ-показників із застосуванням факторного аналізу зроблена оцінка найбільш вірогідних причин формування атмосферного забруднення дослідженої території в різні роки пробовідборів. Встановлено, що найвірогіднішими чинниками формування стану забруднення повітря в «Олександрії» і на прилеглих вулицях Білої Церкви є такі. Фактор-1: загальне пилове навантаження на атмосферу з переважанням теригенної складової (здебільшого крупно-дисперсні часточки). Фактор-2: пило-аерозольне навантаження на територію дендропарку з боку міста Біла Церква, що в значній мірі забезпечується мікрокліматичною циркуляцією типу міського бризу і проявляється у формуванні атмогеохімічної асоціації, яка складається з хімічних елементів, властивих для будіндустрії і виробництва будматеріалів. Фактор-3 – чинник потужних локальних (імпактних) атмотехногенних впливів на приземну атмосферу парку. Він проявив себе двояко: в 2009 р. – як вплив стрільбища, в 2021 році – як дія кислих опадів, сформованих завдяки атмосферним викидам Білоцерківської ТЕС. Фактор-4 нами інтерпретований як чинник комплексного впливу на екосистеми «Олександрії» місцевої екологічної катастрофи 1990-х рр., але такий, що від 2009 до 2021 року свій вплив зменшував. Фактор-5 – це геохімічне навантаження на довкілля, викликане гальванічними виробничими відходами. Вони надійшли під час згаданої катастрофи, тому фактор-5 можна вважати «підфактором» четвертого чинника і таким, що за дванадцятирічний період значно ослаб. Фактор-6 вважається фактором впливу лише нафтопродуктового забруднення території парку, викликаного також минулою екологічною катастрофою. В 2021 р. він був скорегований і ускладнений щодо свого впливу на екосистеми «Олександрії» чинниками біогенної природи (біогеохімічними і біохімічними). В певній мірі фактор-6 також можна розглядати як «підфактор» четвертого чинника.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Блюм О. Б., Тютюнник Ю. Г. Исторический биомониторинг содержания свинца в атмосфере с помощью лишайников. *Доклады Академии наук УССР. В*. 1985. № 10. С. 53-55.
2. Блюм О. Б., Тютюнник Ю. Г. Исторический аспект регионального мониторинга тяжелых металлов в атмосфере, осуществляемый методом биогеохимической лихеноиндикации (на примере Украинской ССР). *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 1989. Т.12. С. 73-78.
3. Sloof J. E., Wolterbeek H. Th. Patterns in trace elements in lichens. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1991. Vol. 57-58. №1. Pp. 785-795. https://doi.org/10.1007/BF00282942.

4. Sloof J., Wolterbeek H. National Trace-Element Air Pollution Monitoring Survey Using Epiphytic Lichens. *The Lichenologist*. 1991. 23. №2. Pp. 139-165. https://doi.org/10.1017/S0024282991000300.
5. Investigation of spatial and temporal metal atmospheric deposition in France through lichen and moss bioaccumulation over one century / Agnan A., Séjalon-Delmas N., Claustres A., Probst A. *Science of the Total Environment*. 2015. Vol. 529. №1. Pp. 285-296. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.083.
6. Cloquet Ch., Estradea N., Carignanc J. Ten years of elemental atmospheric metal fallout and Pb isotopic composition monitoring using lichens in northeastern France. *Comptes Rendus Geoscience*. 2015. Vol. 347. №5. Pp. 257-266. https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.04.003.
7. Ковалевский А. Л. Биогеохимия растений : монография. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1991. 288 с.
8. Блюм О. Б., Тютюнник Ю. Г., Пащенко В. М. Біогеохімічна ліхеноіндикація важких металів у приземному шарі повітря міських ландшафтів. *Український ботанічний журнал*. 1988. № 3. С. 66-71.
9. Геостатистический анализ техногенного воздушного влияния не лесопарковый ландшафт (на примере города Киева) / Тютюнник Ю. Г., Блюм О. Б., Даунис-и-Эстаделья Дж., Мартин-Фернандес Дж.-А. *География и природные ресурсы*. 2014. № 1. С. 68-74.
10. Плескач Л. Я. Забруднення водойм дендропарку «Олександрія» та його вплив на стан рослинності *Інтродукція рослин*. 2004. №2. С. 80-87.
11. Плескач Л. А. Исследование видового состава травянистой флоры техногенно загрязненных водоемов дендропарка „Александрия". *Ботанические сады как центры сохранения и рационального использования растительных ресурсов*. Москва, 2005. С. 401-403.
12. Плескач Л. Я. Видовий склад деревної та трав'янистої рослинності техногенно забруднених водойм дендропарку «Олександрія» *Вісник Одеського національного університету*. Т.13. Вип.16. Одеса: Одес. нац. ун-т, 2008. С.35-40.
13. Исследование генетически различных полей загрязнения охраняемой территорий: геостатистический анализ данных биоиндикации / Тютюнник Ю. Г., Даунис-и-Эстаделья, Блюм О. Б., Мартин-Фернандес Д. А. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2012. №4. С. 336-343.
14. Kuik P., Wolterbeek, H. T. Factor analysis of trace-element data from tree-bark samples in The Netherlands. *Environ Monit Assess.* 1994. 32. Pp. 207–226. https://doi.org/10.1007/BF00546277.
15. Th. Atmospheric heavy metal pollution in Slovenia derived from results for epiphytic lichens / Jeran Z., Jacimovic R., Batic F., Smodis B., Wolterbeek H. *Fresenius J Anal Chem*. 1996. 354. Pp. 681-687.
16. Characterisation of Heavy Metals in Lichen Species Hypogymnia physodes and Evernia prunastri due to Biomonitoring of Air Pollution in the Vicinity of Copper / Balabanova B., Stafilov T., Šajn R., Baèeva K. *Mine International Journal of Environmental Research*. 2012. Vol. 2. 3. Pp. 779-794.
17. Серёгин И. В., Кожевникова А. Д. Роль тканей корня и побега в транспорте и накоплении кадмия, свинца, никеля и стронция. *Физиология растений*. 2008. Т. 55. № 1. С. 3-26.
18. Vasilevich M. I., Vasilevich R. S. Features of Heavy Metal Accumulation by Epiphytic Lichens in Background Areas of the Taiga Zone in the European Northwest of Russia. *Russian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 49. 1. Pp. 14–20. https://doi.org/10.1134/S1067413618010137
19. The use of passive lichen biomonitoring in combination with positive matrix factor analysis and stable isotopic ratios to assess the metal pollution sources in throughfall deposition of Bolu plain, Turkey / Dörter M., Karadeniz H., Saklangıç U., Yenisoy-Karakaş S. *Ecological Indicators*. 2020. 06/01. Pp. 43-62. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106212
20. Origin and spatial distribution of metals in moss samples in Albania: A hotspot of heavy metal contamination in Europe / Lazo P., Steinnes E., Qarri F., Allajbeu Sh., Kane K., Stafilov T., Frontasyeva M. V., Harmens H. *Chemosphere.* 2018. Vol. 190. Pp. 337–349. http://nora.nerc.ac.uk/517990/
21. Геохимия окружающей среды : монограф. / Ачкасов А. И., Башаркевич И. Л., Онищенко Т. Л. и др. Москва : Недра, 1990. 336 с.
22. Плескач Л. Я. Фітотоксичність техногенно забруднених грунтів дендропарку «Олександрія» НАН України. *Інтродукція рослин*. 2002. №1. С. 122-128.
23. Давыдова С. Л., Тарасов В. И. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде. Москва : Изд-во РУДН, 2004. 163 с.

REFERENCES

1. Blum, O.B. & Tyutyunnik, Yu.G. (1985). Istoricheskiy biomonitoring soderzhaniya svintsa v atmosfere s pomoshch'yu lishaynikov [Historical biomonitoring of lead content in the atmosphere using lichens]. *Doklady Akademii nauk USSR* [*Rep. of Acad. Sc. Ukrainian SSR*]. B. N.10., pp. 53-55. (in Russ.)
2. Blum, O.B. & Tyutyunnik, Yu.G. (1989). Istoricheskiy aspekt issledovaniya obnaruzheniya metallov v atmosfere, voskreseniye biogeokhimicheskoy likhenoindikatsii (po rasprostraneniyu Ukrainskoy SSR) [Historical aspect of regional monitoring of heavy metals in the atmosphere, carried out by the method of biogeochemical lichen indication (on the example of the Ukrainian SSR)]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistemy* [*Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*]. vol.12. pp. 73-78. (in Russ.)
3. Sloof, J.E. & Wolterbeek, H.Th. (1991). Patterns in trace elements in lichens. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 57-58, №1, pp. 785-795. https://doi.org/10.1007/BF00282942.
4. Sloof, J., & Wolterbeek, H. (1991). National Trace-Element Air Pollution Monitoring Survey Using Epiphytic Lichens. *The Lichenologist*., 23(2), pp. 139-165. https://doi.org/10.1017/S0024282991000300.
5. Agnan, A., Séjalon-Delmas, N., Claustres, A. & Probst, A. (2015). Investigation of spatial and temporal metal atmospheric deposition in France through lichen and moss bioaccumulation over one century. *Science of the Total Environment*, vol. 529(1), pp. 285-296, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.083.
6. Cloquet, Ch., Estradea, N. & Carignanc, J. (2015). Ten years of elemental atmospheric metal fallout and Pb isotopic composition monitoring using lichens in northeastern France. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 347(5), pp. 257-266, https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.04.003
7. Kovalevsky, A.L. (1991) *Biogeokhimiya rasteniy* [*Biogeochemistry of plants*]. Novosibirsk : Nauka, Sib. Department. (in Russ.).
8. Blum, O.B., Tyutyunnik, Yu.G. & Pashchenko, V.M. (1988). Bioheokhimichna likhenoindykatsiya vazhkykh metaliv u pryzemnomu shari povitria miskykh landshaftiv

[Biogeochemical lichenoindication of important metals in the surface area of the earthly landscapes] *Ukrainskiy botanicheskiy zhurnal* [*Ukr. bot. journal*], №3, pp. 66-71. (in Ukr.)
9. Tyutyunnik, Yu.G., Blum, O.B., Daunis y Estadella, J., Martin-Fernandez, J.-A. (2014). Geostatisticheskiy analiz tekhnogennogo vozdushnogo issledovaniya nelesoparkovogo landshafta (nakhozhdeniya goroda Kiyeva) [Geostatistical analysis of man-made air influence on a non-forest landscape (on the example of the city of Kyiv)]. *Geografiya i prirodnyye resursy* [*Geography and Natural Resources*], №.1, pp. 68-74. (in Russ.).
10. Pleskach, L.Ya. (2004). Zabrudnennya vodoim dendroparku «Oleksandríya» i yoho vplyv na stan roslinosti [Pollution of reservoirs of the Arboretum "Olexandria" and its effect on the state of vegetation] *Introduktsíya roslyn* [*Introduction of Plant*], 2, pp. 80-87. (in Ukr.)
11. Pleskach, L.A. (2005). Issledovaniye vidovogo sostava travyanistoy flory tekhnogenno zagryaznennykh vodoyemov dendroparka «Aleksandriya» [Study of the species composition of the herbaceous flora of man-made polluted reservoirs of the arboretum "Alexandria"]. *Botanicheskiye sady kak tsentry sobraniya i yestestvennogo ispol'zovaniya rastitel'nykh resursov* [*Botanical gardens as centers for the conservation and rational use of plant resources*], pp. 401-403. (in Russ.).
12. Pleskach, L.Ya. (2008). Vydovyi sklad derevnoí ta travianystoí roslynností tekhnohenno zabrudnenykh vod dendroparku «Oleksandríia» [Species warehouse of wood and grassy growths of man-made polluted water near the Oleksandriya arboretum] *Vísnyk Odeskoho natsionalnoho universitetu* [*Bulletin of the Odessa National University*], 13(16), pp.35-40. (in Ukr.)
13. Tyutyunnik, Yu.G., Daunis y Estadella, Blum, O.B. & Martin-Fernandez, D.A. (2012) Issledovaniye geneticheski razlichnykh poley porazheniya okhranyayemoy territorii: geostatisticheskiy analiz dannykh bioindikatsii [Study of genetically different pollution fields in protected areas: geostatistical analysis of bioindication data] *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* [*Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*], 4. pp. 336-343. (in Russ.)
14. Kuik, P. & Wolterbeek, H.T. (1994). Factor analysis of trace-element data from tree-bark samples in The Netherlands. *Environ Monit Assess,* 32, pp.207–226, https://doi.org/10.1007/BF00546277
15. Jeran, Z., Jacimovic, R., Batic, F., Smodis, B. & Wolterbeek, H.Th. (1996). Atmospheric heavy metal pollution in Slovenia derived from results for epiphytic lichens. *Fresenius J Anal Chem*, 354, pp. 681-687.
16. Balabanova, B., Stafilov, T., Šajn, R. & Baèeva, K. (2012). Characterisation of Heavy Metals in Lichen Species Hypogymnia physodes and Evernia prunastri due to Biomonitoring of Air Pollution in the Vicinity of Copper Mine. *International Journal of Environmental Research*, 2(3), pp. 779-794.
17. Seregin, I.V. & Kozhevnikova, A.D. (2008). Rol' tkaney kornya i pobega v transporte i nakoplenii kadmiya, svintsa, nikelya i strontsiya [The role of root and shoot tissues in the transport and accumulation of cadmium, lead, nickel and strontium] *Fiziologiya rasteniy* [*Plant Physiology*], 55(1), pp. 3-26. (in Russ.)
18. Vasilevich, M.I. & Vasilevich, R.S. (2018). Features of Heavy Metal Accumulation by Epiphytic Lichens in Background Areas of the Taiga Zone in the European Northwest of Russia. *Russian Journal of Ecology*, 49(1), pp. 14–20. https://doi.org/10.1134/S1067413618010137.
19. Dörter, M., Karadeniz, H., Saklangıç, U. & Yenisoy-Karakaş, S. (2020). The use of passive lichen biomonitoring in combination with positive matrix factor analysis and stable isotopic ratios to assess the metal pollution sources in throughfall deposition of Bolu plain, Turkey. *Ecological Indicators*, 2020-06/01, pp. 43-62, https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106212.
20. Lazo, P., Steinnes, E., Qarri, F., Allajbeu, Sh., Kane, K., Stafilov, T., Frontasyeva, M.V. & Harmens, H. (2018). Origin and spatial distribution of metals in moss samples in Albania: A hotspot of heavy metal contamination in Europe. *Chemosphere,* 190, pp. 337–349. http://nora.nerc.ac.uk/517990/
21. Achkasov, A.I., Basharkevich, I.L., Onishchenko, T.L. et al. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [*Geochemistry of the environment*]. Moscow: Nedra, 1990. (in Russ.)
22. Pleskach, L.Ya. (2002). [Phytotoxicity of man-made soiled soils in the arboretum "Oleksandriya" of the National Academy of Sciences of Ukraine]. *Introduction of plants.* [*Introduction of plants*], 1, pp. 122-128. (in Ukr.)
23. Davydova, S.L. & Tarasov, V.I. *Neft' i nefteprodukty v okruzhayushchey srede* [*Oil and oil products in the environment*]. Moscow : Publishing House of RUDN University, 2004. (in Russ.).

BIOGEOCHEMICAL LICHEN INDICATION STUDY OF FORMATION AND TEMPORAL CHANGES OF OLEKSANDRIIA ARBORETUM ATMOSPHERIC POLLUTION

O. V. Shabatura[1], Yu. H. Tyutyunnyk[2], O. B. Blum[3]

[1] - Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, str. Vasylkivska, 90, Kyiv, 03022, Ukraine, oshabatura@knu.ua
[2] - M.M. Hryshko National Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine,
St. Tymiryazuzska, b. 1, Kyiv, 01014, Ukraine, yulian.tyutyunnik@gmail.com
[3] - M.M. Hryshko National Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine,
St. Tymiryazuzska, b. 1, Kyiv, 01014, Ukraine, oleg_blum@ukr.net

Using the method of biogeochemical lichen indication the levels of the average long-term content of K, Ca, Al, Fe, Mg, Na, Mn, Zn, Sr, Ti, Ba Cu, B, Pb, Ni, V, Cr, Co, Cd, Se, Sb in surface air were measured on the territory of Olexandriia Arboretum and adjacent territories (Bila Tserkva, Kyiv Region, Ukraine). The purpose of the study is to determine the state and dynamics of the atmospheric geochemical field on the territory of Olexandriia Arboretum and its

surroundings. The method of biogeochemical lichen indication based on the values of micro- and macroelements content in epiphytic lichens was used as a research tool. Application of the ICP-OES spectroscopy method allowed the analysis for chemical elements content of the samples of epiphytic deciduous *Parmelia sulcata*, *Xanthoria parietina* and bushy *Evernia prunastri* lichens collected in 2009 (20 points) and 2021 (23 points).

In order to identify possible sources of entering of certain elements into lichens the researchers used the factor analysis method, i.e. a method of principal components with Varimax factors rotation. Six obtained factors represent: the impact of land cover (the most significant factors F_1–F_3) and man-made components (minor polygenetic, factors F_4–F_6). As a factor's number decreases, its partial explanatory variance decreases too. Factor F_1 represents a common dust loading on the atmosphere with a predominance of the terrigenous component (mostly coarse-dispersed particles). Factor F_1 is responsible for the dust-aerosol loading that is largely caused by the microclimatic circulation of the city breeze type thus forming a peculiar atmospheric and geochemical association that consists of chemical elements related to the building industry and building materials production. Powerful, however, local (impactful) atmospheric man-made influences manifest themselves through factor F_3. Minor factors' discrimination ability reduces if a source of atmospheric pollution is less significant. Both division of factors into subfactors and noticeable temporal dynamics are observed more often. For instance, factor F_4 has two geochemical sub-associations affected by the impact on the Olexandriia's landscapes of the 1990s' ecological disaster (fall-out of oil products, geochemical marker – V) and galvanic waste causing soil pollution (Zn, Mg, Cr, Ni and Ti), as well as discharges of agricultural enterprises (K). One of the peculiarities of F_4 is a gradual decrease in its intensity over time. Factor F_5 should be interpreted as the only load on the environment associated with galvanic pollution with cobalt being replaced by copper as a leading pollution marker. We suggest considering Factor F_6 as a factor associated with oil pollution only.

Key words: lichens, biogeochemical lichen indication, macro- and microelements, heavy metals, air pollution, factor analysis, Alexandriia Arboretum.

Подання до редакції **: 19. 07. 2023**
Надходження остаточної версії **: 18. 09. 2023**
Публікація статті : **21. 12. 2023**

Ukrainian hydrometeorological journal, 2023, 32, 130-143 doi: 10.31481/uhmj.32.2023.09
ISSN 2311-0902 (print), 2616-7271 (online)

УДК 551.510.42, PACS 92.00.00, 89.60.Gg:

СТАН ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ НАПЕРЕДОДНІ ПОВНОМАСШТАБНОГО РОСІЙСЬКОГО ВТОРГНЕННЯ. ЧАСТИНА 2: ЗАГАЛЬНИЙ ВМІСТ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

М. В. Савенець, Л. М. Надточій, Т. В. Козленко, К. М. Комісар, Н. С. Жемера

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,
пр-т. Науки, 37, 03028, Київ, Україна, savenets@uhmi.org.ua

Робота присвячена дослідженню загального вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі в Україні для встановлення базового стану якості атмосферного повітря напередодні повномасштабного російського вторгнення. Дослідження проведені на основі щоденних даних супутникового зондування приладом TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) на супутнику Sentinel-5 Precursor (5P) для діоксиду азоту (NO_2), діоксиду сірки (SO_2), монооксиду вуглецю (CO) та формальдегіду (CH_2O). Встановлено особливості просторового розподілу забруднюючих речовин з повним охопленням території України. Незважаючи на зростання ролі автотранспорту, найбільш забруднене повітря продовжувало спостерігатися над великими промисловими містами та над населеними пунктами із основними тепловими електростанціями. Високі значення вмісту забруднюючих речовин над такими містами під впливом переважаючого перенесення формують основні осередки забрудненого повітря, що охоплюють значні території. Так, основними забрудненими зонами є Донецька область; території центральної України вздовж р. Дніпро та колишнього Каховського водосховища; м. Харків і Зміївська ТЕС; м. Київ і Трипільська ТЕС; та територія на заході, що охоплює Львів, Добротвірську і Бурштинську ТЕС. Забруднення від цих районів визначає якість атмосферного повітря за переважаючим напрямком вітру. За умов високих швидкостей вітру, забруднене повітря від промислово навантажених районів може поширюватися на найбільш чисті території, якими є високогірні райони в Українських Карпатах та Криму, північ Полісся, і над заповідником «Медобори» на Поділлі. Для кожної забруднюючої речовини встановлені кількісні показники швидкості та напрямку вітру, які формують вищі значення загального вмісту над відносно чистими територіями. Залежно від висоти граничного шару атмосфери (ГША) змінюються умови розсіювання домішок в атмосфері. Встановлено, що за висот ГША менше ніж 500 м значно зростає загальний вміст NO_2, CO та SO_2 як у містах, так і над чистими районами з відсутніми джерелами викидів. Виявлено зворотну залежність вмісту CH_2O від висоти ГША, пов'язану із інтенсивним фотохімічним утворенням домішки на висотах. Досліджений базовий стан якості атмосферного повітря може бути використано для оцінки наслідків воєнних дій в Україні та розробленні заходів післявоєнного розвитку.

Ключові слова: Sentinel-5P; загальний вміст; забруднення; викиди; атмосферне повітря.

1 ВСТУП

У лютому 2022 року розпочалося повномасштабне російське вторгнення на територію України. Перерозподіл джерел викидів, руйнування промислових підприємств, формування численних нових джерел викидів внаслідок воєнних дій та ракетних ударів – усе це призводить до зміни просторово-часових закономірностей формування поля забруднення над територією України. Будь-яка оцінка наслідку воєнних дій на стан якості атмосферного повітря потребує наявності опису базового стану забруднення напередодні війни. Тільки за умов порівняння із базовим станом є можливим проведення надійної оцінки змін у концентраціях забруднюючих речовин та їх мінливості. У попередній роботі [1], представлено аналіз базового стану для приземного вмісту забруднюючих речовин на основі даних наземних спостережень. Проте, точковість вимірів та мала кількість постів спостережень не дозволяє отримати повне уявлення про якість атмосферного повітря. Враховуючи часткову втрати постів моніторингу, а також факт формування більшості джерел викидів на територіях без наземних спостережень, існує потреба у описі базового стану за даними супутникових спостережень, що дозволить повністю охопити

територію України та, у майбутньому, оцінити наслідки з повним просторовим охопленням.

Незважаючи на недоліки супутникового зондування, пов'язані із залежність від хмарності та значеннями вмісту забруднюючої речовини у стовпі атмосфери, їх використання показало вкрай ефективний засіб для якісної оцінки рівнів забруднення [2-4] і вирішенням задач управління якістю атмосферного повітря [5]. Значне покращення просторової роздільної здатності вмісту хімічних складових відбулося із запуском супутника Sentinel-5 Precursor (5P) з приладом TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) на борту, що дозволило деталізувати оцінки без погіршення у просторовому охопленні [6,7]. Показано хорошу узгодженість супутникових і наземних даних [8], що для території України може порушуватися у зв'язку із особливістю розташування постів спостережень поблизу прямого впливу джерел викидів [9]. Використання супутникових даних із метою окреслення базового стану якості атмосферного повітря для проведення порівняння було проведено для оцінки наслідків впливу пандемії COVID-19 [3,10-12]. Частково це вже починає розглядатися і у випадку російського повномасштабного вторгнення [13,14].

В Україні вже набуло широкого використання супутникових даних хімічних складових атмосферного повітря. Здійснені як якісна оцінка стану окремих урбанізованих територій чи усієї території України [15-17], так і кількісна оцінка різноманітних параметрів у поєднанні із даними наземних спостережень [9,18-20]. Розпочалися процеси з інтегрування супутникових даних із іншими джерелами інформації задля створення концепції сучасного моніторингу [21].

Метою даної роботи є оцінка типових статистичних характеристик забруднення атмосферного повітря за даними супутникових спостережень напередодні повномасштабного російського вторгнення, здійсненого для основних забруднюючих речовин (діоксиду сірки (SO_2), монооксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO_2) та формальдегіду (CH_2O). Важливим є врахування метеорологічних умов формування загального вмісту забруднюючих речовин задля встановлення територій, що найбільше потерпають від забруднення великих міст внаслідок атмосферного перенесення, та виявлення умов за яких високий вміст може формуватися над відносно чистими районами території України.

2 ВИХІДНІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведено на основі щоденних даних супутникових спостережень Sentinel-5P приладом TROPOMI із просторовою роздільною здатністю 3.5×5.5 км за період з 2019 до 2021 рр. Аналіз здійснено для загального вмісту діоксиду азоту (NO_2), монооксиду вуглецю (CO), формальдегіду (CH_2O) та діоксиду сірки (SO_2) у вертикальному стовпі атмосферного повітря (одиниці вимірювання: моль/м^2). Дані завантажено із офіційного хабу Sentinel-5P (https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home) у вигляді режимних (англ.: offline (OFFL)) даних другого рівня архівації (Level-2).

У зв'язку з тим, що покриття Sentinel-5P відрізняється із дня у день і координати пікселів не співпадають, дані було впорядковано у регулярну сітку координат із кроком $0.1^o \times 0.1^o$ (англ.: binning procedure) із використанням програмного пакету HARP [22] для автоматизації процесу. Впорядкування у регулярну сітку дозволило сформувати часові ряди для кожного гріду (загальна кількість грідів для території України і суміжних областей складає 21000). Фільтрування даних проведено за рекомендованими стандартними значеннями індексу якості даних (англ.: quality assurance value) 0.75 для NO_2, та 1.0 для CO, CH_2O і SO_2.

Так як загальний об'єм супутникових даних Sentinel-5P використаних для дослідження перевищував 3 Тб, увесь процес обробки даних здійснено із використанням мов програмування Python, VB.NET та bat-скриптів.

Аналіз супутникових даних вмісту забруднюючих речовин супроводжувався аналізом метеорологічної інформації із реаналізу ERA5 [23]. Супутникові дані надходять один раз на добу близько 13:00, тому у випадку окремих розрахунків, що потребують сумісного використання даних забруднення та метеорологічної інформації, використано лише строк 10UTC. Загалом сумісний аналіз проведено для метеорологічних параметрів, що впливають на умови розсіювання домішок: напрямку та швидкості вітру, і висоти граничного шару атмосфери (ГША).

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Повне уявлення про базовий стан забруднення атмосферного повітря на основі даних супутникових спостережень, за яким можливо здійснити майбутню оцінку наслідку

воєнних дій, потребує як аналізу загального вмісту забруднюючих речовин, так і розуміння залежності формування поля забруднення від метеорологічних умов. Це дозволить виявити, які території перестали або почали зазнавати негативного впливу від викидів, та як перерозподіл джерел викидів вплинув на формування забруднення у відносно чистих районах. Тому, у даній статті аналіз результатів здійснено у два етапи: оцінки стану забруднення атмосферного повітря над територією України та оцінки впливу метеорологічних умов на поширення і зміни загального вмісту забруднюючих речовин.

3.1 Стан забруднення атмосферного повітря над територією України

Напередодні повномасштабного російського вторгнення, найбільш забруднене атмосферне повітря продовжувало спостерігатися у промислових містах України. Незважаючи на роль викидів від пересувних джерел та менші обсяги виробництва у порівнянні із попередніми десятиріччями, все ще зберігалася визначальна роль промисловості у формуванні локальних максимумів концентрацій забруднюючих речовин.

Середні значення загального вмісту NO_2 у 2019-2021 рр. були найвищими у промислових містах Донбасу та невеликих містах із потужними ТЕЦ, зокрема у Кураховому, Новому Світі, Донецьку, Світлодарську, Слов'янську, Краматорську (Донецька область), Бурштині (Івано-Франківськ область) та Добротвірі (Львівська область). Типовими для цих міст є значення близько $5.0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2 (рис. 1а), що перевищували вміст у великих містах зі значним внеском автотранспорту (як Київ, Дніпро, Харків). Фонові значення відрізняються залежно від території та щільності розташування міст. На більшій частині території України фоновий вміст NO_2 складає $4.0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2, а у віддалених районах від промислових міст – близько $3.0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2. Більш чистими є північні райони Житомирської, Чернігівської та Сумської областей, південь Херсонської, північ і південь Одеської, західна частина Кіровоградської областей, а також більша частина Миколаївської області та АР Крим за умови віддаленості від великих міст більше ніж на 50 км. Мінімуми просторового розподілу NO_2 спостерігаються у високогірних районах Карпат та Криму.

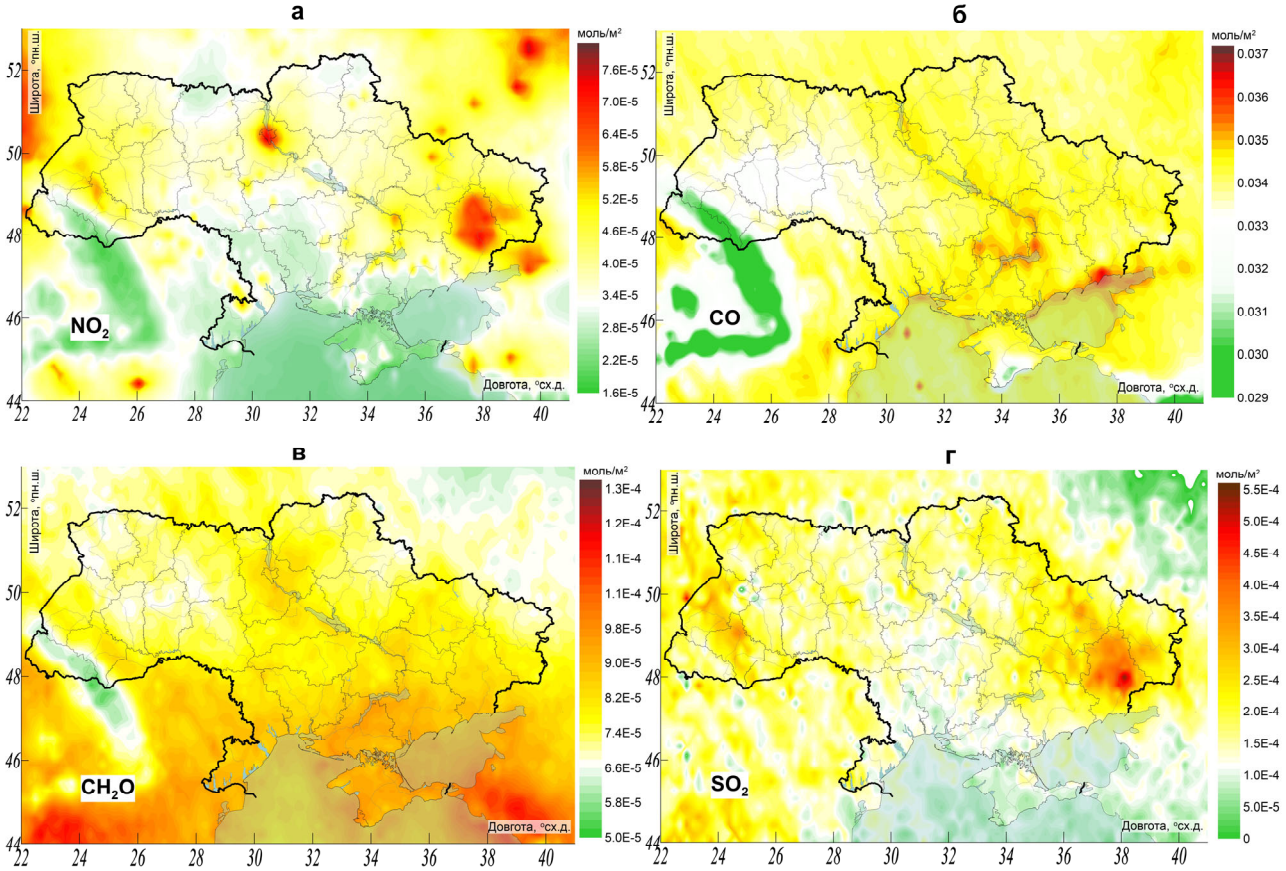


Рис. 1 – Просторовий розподіл загального вмісту NO_2 (а), CO (б), CH_2O (в) та SO_2 (г) за період 2019-2021 рр.
Fig. 1 – Spatial distribution of NO_2 (a), CO (б), CH_2O (в) and SO_2 (г) total content for the period of 2019-2021

Загальний вміст CO в атмосфері розподілений більш однорідно завдяки довшому часу існування в атмосферному повітрі (кілька місяців у порівнянні із кількома годинами для NO_2), розподіляючись між основними районами із великою кількістю джерел викидів. Над територією України середні значення CO варіюють від 0.030 моль/м^2 до 0.036 моль/м^2 (рис. 1б). Максимуми у просторовому розподілі спостерігаються тільки на рівні окремих урбанізованих районів з потужними промисловими викидами. Такими містами на території України напередодні війни були Маріуполь, Дніпро, Запоріжжя, Кривий Ріг, а також територія, що охоплює міста Марганець – Нікополь – Енергодар. Дещо менший вміст CO, з осередками підвищених значень на захід за переважаючим перенесенням повітряних мас, характерний для Києва й Українки, а також над містами Горішні Плавні, Кременчук і Світловодськ. Забрудненою є берегова лінія, що пов'язано із викидами морського транспорту, яке переважно використовує достатньо «брудне» паливо. Як було показано у [17], з травня по вересень значний внесок мали туристичні судна. Фонові значення над більшою частиною території України сягають 0.034 моль/м^2. Мінімуми просторового розподілу характерні для Подільської височини із загальним вмістом CO близько 0.033 моль/м^2; Кримських гір із вмістом 0.031 моль/м^2, та Українських Карпат із вмістом близько 0.030 моль/м^2.

Менша точність визначення загального вмісту CH_2O призводить до неможливості детального визначення наслідків більшої кількості викидів. Просторовий розподіл над територією України переважно відображає закономірності сформовані великомасштабними процесами (рис. 1в), тобто процесами перенесення від найпотужніших джерел викидів та загальними закономірностями вторинного фотохімічного формування CH_2O внаслідок розкладу алкенів [24,25]. Загальний вміст CH_2O зростає у напрямку на південь зі зміною фонового вмісту із $7.5\cdot10^{-5}$ моль/м^2 на півночі території України до $9.0\cdot10^{-5}$ моль/м^2 на півдні. В той же час, простежуються наслідки викидів від великих міст, зокрема Києва, Дніпра, Запоріжжя, та ін. Оцінити кількісно ці наслідки неможливо, проте якісно CH_2O перевищує фонові значення приблизно на 30%. Мінімуми просторового розподілу характерні для Українських Карпат та заповідних територій в районі Шацьких озер і на Подільській височині, де середній вміст CH_2O зменшується до $5.0\cdot10^{-5}$ моль/м^2.

Загальний вміст SO_2 у атмосфері переважно використовується для виявлення наслідків потужних джерел викидів, у той час як чутливість приладів не дозволяє кількісно аналізувати невисокий вміст SO_2. Над територією України максимуми формуються над містами із великими ТЕС, та потужними промисловими підприємствами, що працюють на твердому паливі. Масштабний осередок високого вмісту SO_2 формується над Донецькою областю із значеннями вище $3.5\cdot10^{-4}$ моль/м^2 (рис. 1г). Подібні осередки прослідковуються над Бурштинською, Добротвірською та Зміївською (смт. Слобожанське) ТЕС. Фонові значення загального вмісту SO_2 не перевищують $1.5\cdot10^{-4}$ моль/м^2.

Узагальнюючи просторовий розподіл загального вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі наведеному на рис. 1, стає можливим виокремити найзабрудненіші райони сформовані сукупністю викидів промислових міст, та найчистіші райони із мінімумами вмісту (рис. 2).

У першу чергу виокремлюється Донецька область, де високі значення забруднюючих речовин продовжували спостерігатися навіть після окупації 2014 року (на відміну від Луганської області). У цьому районі значні викиди продовжували спостерігатися по обидві сторони від лінії розмежування, що сприяло формуванню єдиного осередку забрудненого повітря. Загалом, цей осередок забрудненого повітря охоплює Слов'янськ, Краматорськ, Курахівську ТЕС, непідконтрольні Донецьк, Харцизьк, Новий Світ із Старобешівською ТЕС, та Маріуполь (до початку повномасштабного вторгнення).

Другий осередок сформовано вздовж р. Дніпро та Каховського водосховища внаслідок викидів від Дніпра, Запоріжжя, Нікополя, Марганця, Енергодара. До цієї ж забрудненої території можна віднести і Кривий Ріг, адже значна повторюваність перенесення атмосферного повітря із західною складовою часто сприяє поширенню шлейфів забруднення від Кривого Рогу змішуючись із забрудненим повітрям навколо міст на вже не існуючому після підриву дамби Каховському водосховищі. Горішні Плавні, Кременчук та Світловодськ на північ від розглянутої території формують невеликий за площею окремий осередок, який

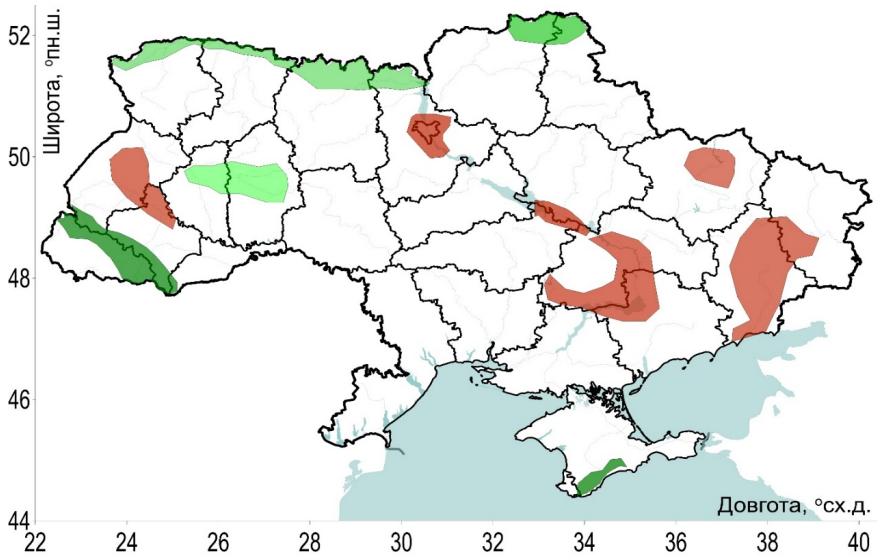


Рис. 2 – Найзабрудненіші (червоний відтінок) та найчистіші (зелений відтінок) райони території України
Fig. 2 – The most polluted (red tint) and the most clean (green tint) areas in Ukraine

можна розглядати як продовження описаного більшого осередку на півдні.

Осередок у Харківській області сформований забрудненим повітрям від викидів Харкова та Зміївської ТЕС у смт. Слобожанське. Загалом, вміст забруднюючих речовин тут нижчий у порівнянні з іншими промисловими районами, проте вирізняється на загальному фоні території.

Схожий за особливостями просторового розподілу і джерелами формування також осередок у Київській області, що сформований внаслідок викидів Києва та Трипільської ТЕС в Українці. Разом вони призводять до формування постійно існуючого осередку значного забруднення, що в останні роки співмірне із забрудненням в Донецькій області.

На заході території забруднений осередок сформовано викидами від Бурштинської та Добротвірської ТЕС, Львова та Калуша. Варто зауважити, що над усією західною частиною території України часто спостерігається транскордонне перенесення забруднення, переважно з промислових районів Польщі.

Щодо районів із найчистішим атмосферним повітрям, то найменші рівні забруднення спостерігаються у Карпатах та Кримських горах. Для більшості забруднюючих речовин, загальний вміст в атмосфері суттєво нижчий за фоновий вміст інших територій. Окремо варто зазначити наявність чистіших осередків на Поліссі, зокрема північ Житомирської та Чернігівської областей; заповідні території Подільської височини (природний заповідник «Медобори»). У названих районах загалом вміст забруднюючих речовин нижчий, що може зрідка порушуватися перенесенням забрудненого атмосферного повітря з інших районів або формуванням лісових пожеж.

3.2 Вплив метеорологічних умов на поширення і зміни загального вмісту забруднюючих речовин

Супутникові дані, отримані для вертикального стовпа атмосферного повітря є зручними для аналізу впливу перенесення забруднюючих речовин вітром і залежності від інтенсивності вертикальних рухів, що простежується за даними висоти ГША. Недоліками є складність знаходження зв'язків із температурою повітря та вологісними показниками, оскільки їх дія спостерігається більшою мірою точково у просторі, тому для подібного аналізу важливими є дані наземної мережі спостережень.

Для даних Sentinel-5P аналіз виконано з метою оцінити напрямки поширення забруднюючих речовин від найбільших промислових міст та районів, і виявити наскільки викиди від міст визначали поле забруднюючих речовин у чистих районах території України. Переважаюче перенесення забруднюючих речовин від найбільш забруднених районів території України здійснено на основі рози вітрів (див. рис. 3). По-перше, варто звернути увагу, це зменшення ролі

західного перенесення у напрямку із заходу на схід. Тобто, на заході території України найбільш негативного впливу зазнають території на схід південний-схід від промислових міст, у центральних районах – вплив переважно однаковий за більшістю напрямків, і на сході території України – негативного впливу зазнають території на захід й північний-захід від промислових об'єктів.

Найбільше від перенесення забруднюючих речовин на заході та півночі території України потерпають райони на схід та південний схід від міст та промислових об'єктів, що є результатом переважаючого перенесення (рис. 3а,б). На півночі території України зростає роль вітру із південною складовою, у результаті чого спостерігається забруднення і на північ від промислових міст. Наприклад, найбільше від викидів м. Київ потерпають Бровари та Бориспіль та навколишні сільські райони. Меншою мірою – Вишгород та населені пункти на північ від Києва.

У центральній та північно-східній частині території України суттєво розширюються повторюваність вітру за різними напрямками (рис. 3в). Негативного впливу в більшій або меншій мірі зазнають усі території навколо міст за винятком південних районів, через незначну повторюваність північного вітру. Переважаючий напрямок вітру на сході території України, де розташовані найбільш забруднені райони, сприяє поширенню домішок на захід і північний захід (рис. 3г). Так, від промислового забруднення Донецької області найбільше потерпають східні частини Запорізької, Дніпропетровської та південь Харківської областей.

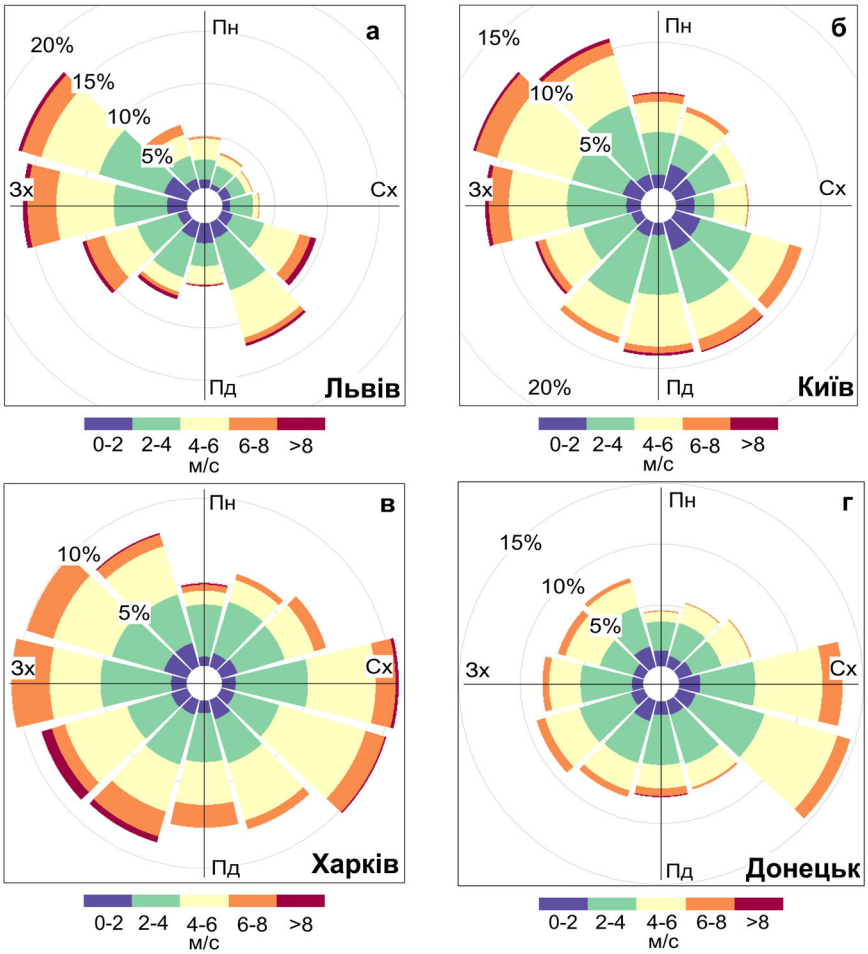


Рис. 3 – Залежність середнього вмісту NO_2 (а), SO_2 (б), CH_2O (в) та CO (г) на території Полісся (межа Житомирської та Київської областей) від напрямку та швидкості вітру

Fig. 3 – The dependence of average NO_2 (а), SO_2 (б), CH_2O (в) and CO (г) on wind speed and direction on the Polissia (border between Kyiv and Zhytomyr Regions)

Вплив переважаючого напрямку вітру від найбільших міст та промислових районів узгоджується із формуванням поля забруднення у чистих районах території України. На рис. 4-7 зображено біваріативні графіки середнього вмісту забруднюючих речовин в атмосфері найбільш чистих районів території України.

Так, на Поліссі на півночі Київської та Житомирської областей найвищі концентрації NO_2, SO_2 та CH_2O спостерігаються у випадку надходження повітря із півдня за швидкості вітру вище 7 м/с (рис. 4а-в). Це підтверджує факт, що найвищого забруднення ці райони зазнають внаслідок надходження забрудненого атмосферного повітря (ймовірно від м. Київ), адже за такої значної швидкості вітру забруднюючі речовини не встигають виводитися із атмосфери і шлейфи можуть бути зафіксовані на відстані більше 100 км від джерел викидів. Винятком є загальний вміст CO в атмосфері, де найвищі концентрації сформовані внаслідок західного перенесення (рис. 4г). Це є наслідком інтенсивних пожеж на півночі України в період з 2019 р. до 2021 р., що спостерігалися у Рівненські й Житомирській областях.

Вивчення надходження забруднення атмосферного повітря на територію Українських Карпат сильно залежить від орієнтації гірського рельєфу та розташування тієї чи іншої території по відношенню до джерел викидів. Це зумовлює відсутність однотипних залежностей для різних забруднюючих речовин (рис. 5). Так, в районі населеного пункту Воловець, NO_2 переважно надходить з північного-заходу за високих швидкостей вітру, що є наслідком активності Бурштинської ТЕС. З південного сходу надходять SO_2 та CH_2O, переважно за високої скорості вітру, що ймовірно надходять з території Румунії та вже перебувають на значних висотах. В той же час, спостерігається локальний осередок SO_2 на захід від населеного пункту Воловець, проте причини його формування наразі неможливо встановити без польових вимірювань. CO надходить з південного заходу, також переважно внаслідок транскордонного перенесення.

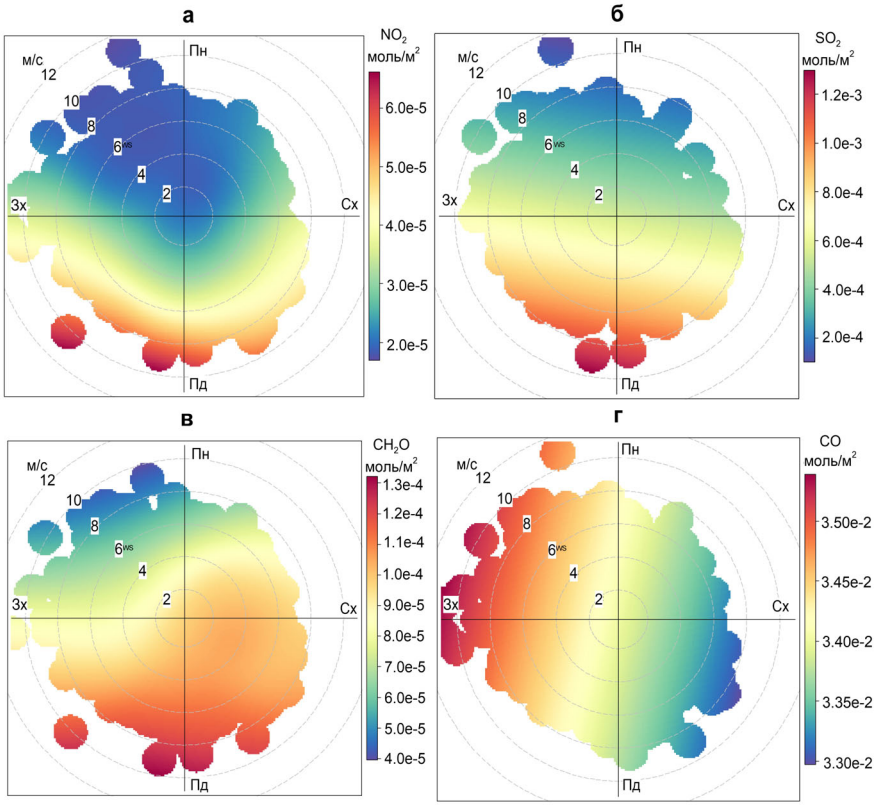


Рис. 4 – Залежність середнього вмісту NO_2 (а), SO_2 (б), CH_2O (в) та CO (г) на території Полісся (межа Житомирської та Київської областей) від напрямку та швидкості вітру

Fig. 4 – The dependence of average NO_2 (а), SO_2 (б), CH_2O (в) and CO (г) on wind speed and direction on the Polissia (border between Kyiv and Zhytomyr Regions)

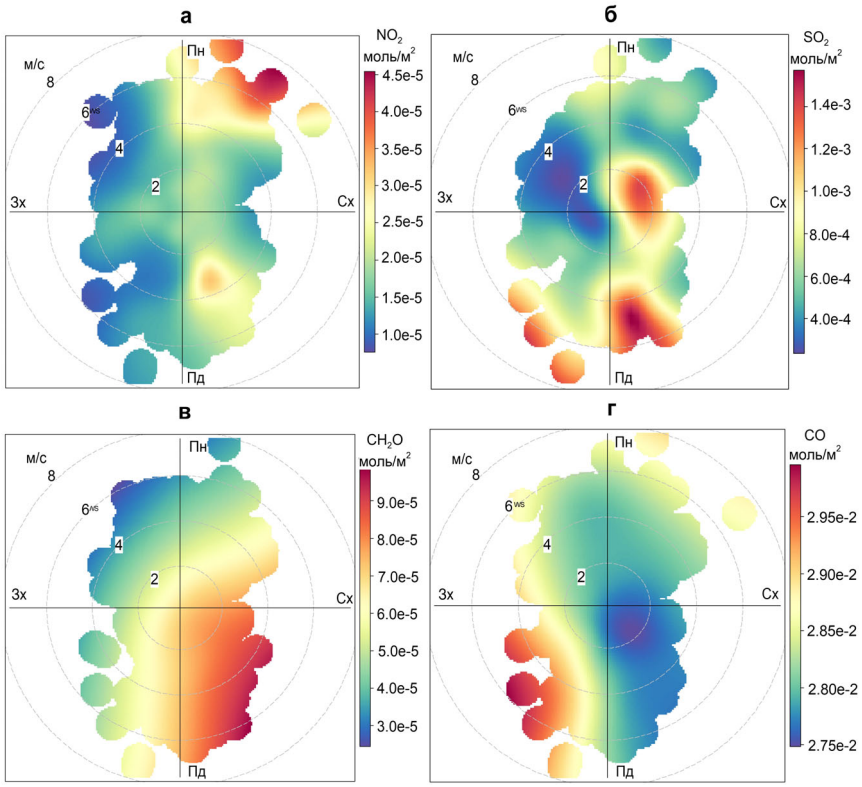


Рис. 5 – Залежність середнього вмісту NO_2 (а), SO_2 (б), CH_2O (в) та CO (г) в Українських Карпатах (район населеного пункту Воловець) від напрямку та швидкості вітру

Fig. 5 – The dependence of average NO_2 (a), SO_2 (б), CH_2O (в) and CO (г) on wind speed and direction in the Ukrainian Carpathians (near Volovets settlement)

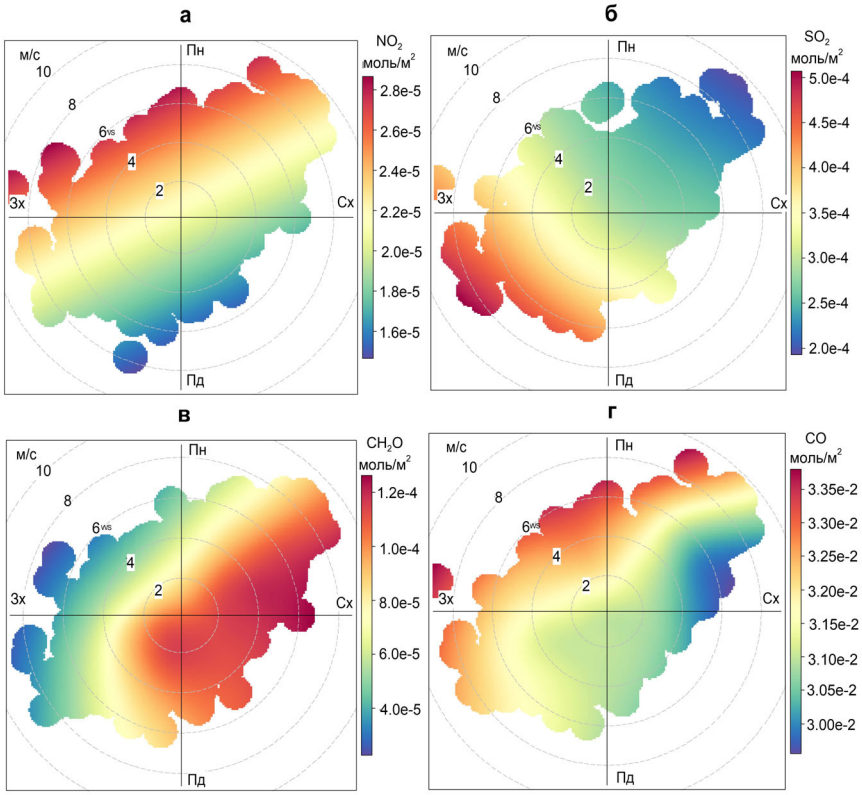


Рис. 6 – Залежність середнього вмісту NO_2 (а), SO_2 (б), CH_2O (в) та CO (г) у Кримських горах (район г. Роман-Кош) від напрямку та швидкості вітру

Fig. 6 – The dependence of average NO_2 (a), SO_2 (б), CH_2O (в) and CO (г) on wind speed and direction in the Crimea mountains (near Roman-Kosh peak)

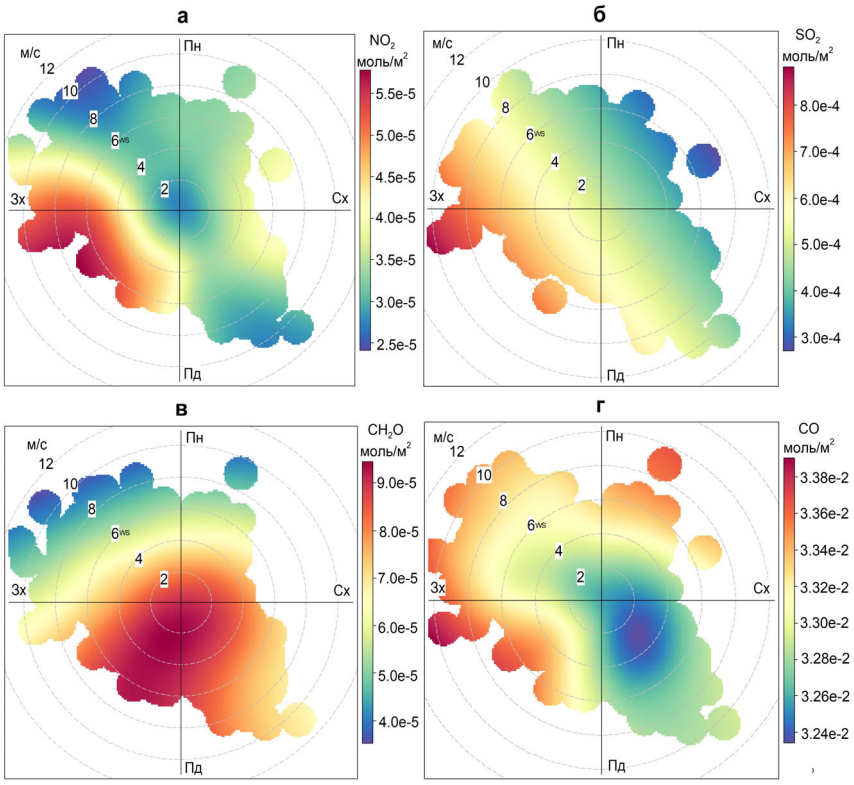


Рис. 7– Залежність середнього вмісту NO_2 (а), SO_2 (б), CH_2O (в) та CO (г) у природному заповіднику "Медобори" від напрямку та швидкості вітру

Fig. 7 – The dependence of average NO_2 (a), SO_2 (б), CH_2O (в) and CO (г) on wind speed and direction in the "Medobory" national park

На території Кримських гір чітко простежується залежність від орієнтації рельєфу по відношенню до моря або суходолу (рис. 6). Такі речовини як NO_2 та CO поширюються від антропогенних джерел викидів на суходолі, в результаті чого спостерігається надходження максимумів з північного напрямку. У той же час, від морського транспорту активно надходять SO_2 та CH_2O, як результат ми спостерігаємо їх надходження зі сторони моря.

У природному заповіднику «Медобори», що також входить до числа найчистіших районів території України, надходження повітря спостерігається переважно із південного заходу (рис. 7). Це відбувається переважно внаслідок надходження забрудненого повітря від Тернополя та, знову ж таки, Бурштинської ТЕС. Варто відмітити інтенсивність формування CH_2O безпосередньо над заповідником. Це може свідчити про роль органічних сполук у формуванні вторинного CH_2O, безпосередньо вже над лісовими масивами.

Поряд із вітровими характеристиками для аналізу загального вмісту забруднюючих речовин у стовпі атмосфери, важливу роль відіграє висота ГША. Фактично, без аналізу висоти ГША неможливо встановити причини і наслідки забруднення на короткотривалих проміжках часу. На рис. 8-9 відображено залежність концентрацій забруднюючих речовин від висоти ГША для забруднених (на прикладі м. Київ) та чистих (на прикладі півночі Полісся) районів території України.

Загальний вміст NO_2 та SO_2 більше ніж вдвічі вищий за висоти ГША до 500 м ніж за висоти вище 1000 м. Тобто, за низької висоти ГША спостерігаються кращі умови накопичення забруднюючих речовин в атмосфері, що чітко фіксується під час супутникових вимірювань. Подібна закономірність спостерігається і для CO над чистими районами. У той же час виявлено досить неочікувану закономірність розподілу CO за різних висот ГША над великими містами (рис. 8), при цьому подібна залежність характерна не тільки для Києва, але й для Харкова та Дніпра. Вміст CO зазвичай однаковий за винятком висот між 1000 і 1500 м. Пояснити формування такої залежності наразі важко, що залишається відкритим питанням для майбутніх досліджень. Цікавою особливістю характеризується загальний вміст CH_2O. Що над забрудненими містами, що над чистими заповідними територіями, вміст CH_2O зростає за значних висот ГША (тобто за кращих умов

розсіювання). Це означає, що вторинне утворення CH_2O в атмосфері внаслідок фотохімічних та хімічних реакцій з іншими хімічними складовими на висотах, переважає антропогенні викиди CH_2O безпосередньо.

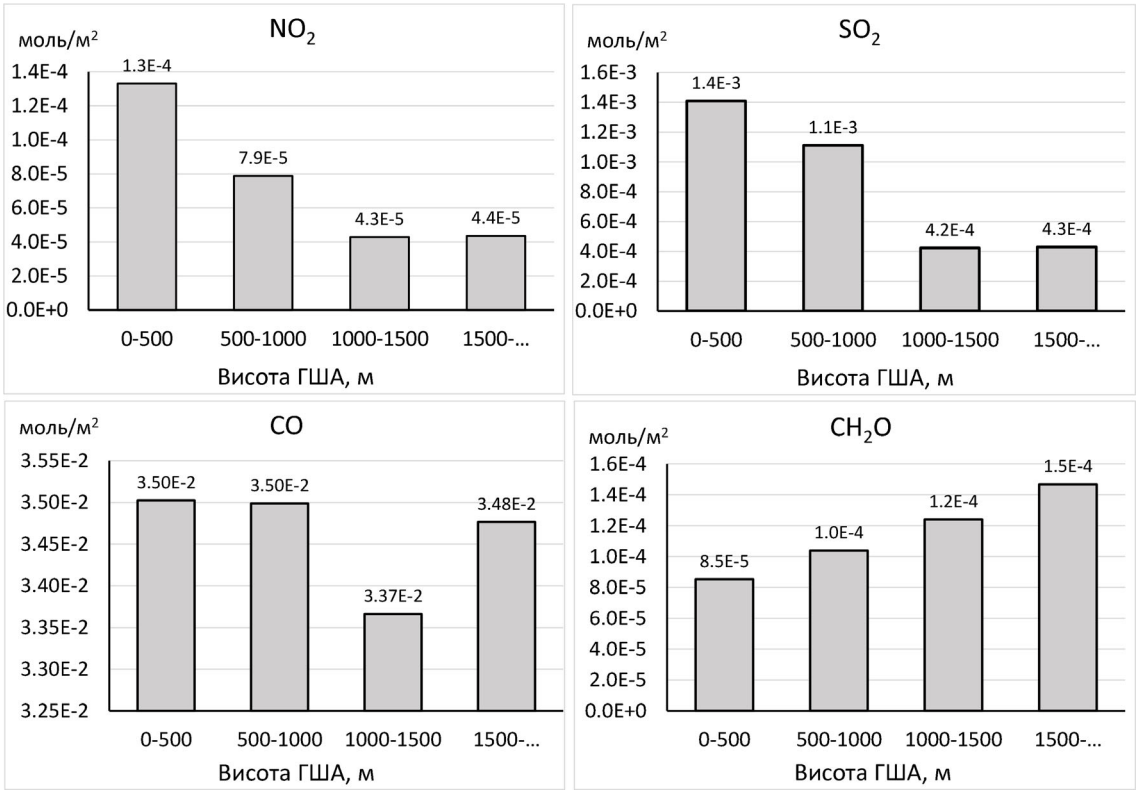


Рис. 8 – Залежність вмісту забруднюючих речовин від висоти ГША на прикладі м. Київ
Fig. 8 – The dependence of pollutants' content on boundary layer height on the example of Kyiv

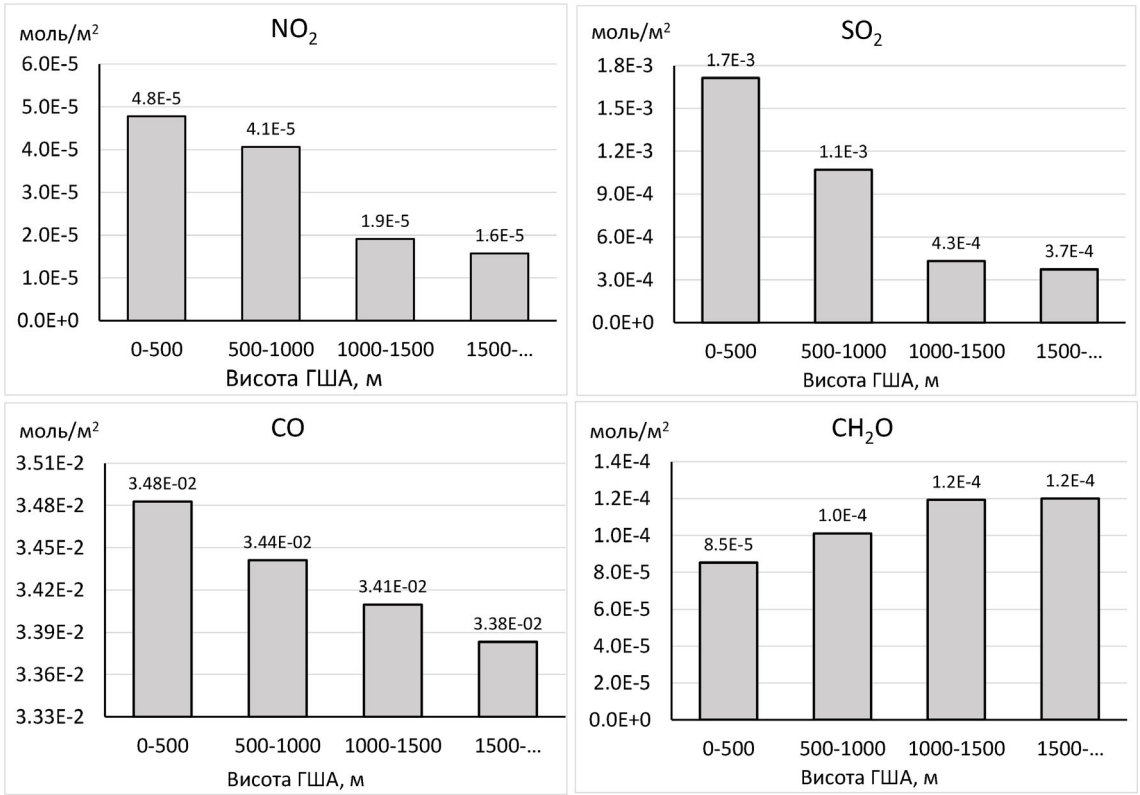


Рис. 9 – Залежність вмісту забруднюючих речовин від висоти ГША на прикладі півночі Полісся
Fig. 9 – The dependence of pollutants' content on boundary layer height on the example of northern Polissia

3.3 Обговорення

У попередній частині досліджень [1], що присвячена даним наземних спостережень за забрудненням атмосферного повітря, наголошувалося на ряді проблем, із якими доводиться стикатися як дослідникам, так і управлінцям під час прийняття рішень. Війна в Україні ускладнює ситуацію через втрату деякої частини постів моніторингу, що й так покривали досить мало міст. Звичайно, на цьому фоні зростатиме роль супутникових даних та атмосферного моделювання. Незважаючи на усі недоліки та неможливість прямо отримати концентрацій у приземному шарі, наразі тільки супутникова інформація використовувалася для оцінки зміни забруднення атмосферного повітря на регіональному рівні [13,14].

У даній роботі наголошено на ключових показниках, що можуть бути використані в якості базового стану напередодні війни для порівняння. Враховуючи похибки індивідуальних значень в пікселях [26-29], найкращим способом є використання узагальнених показників. У цьому випадку, осереднення за певний інтервал часу показало хорошу можливість проводити окреслення найбільш забруднених та чистих районів. Поєднання осередненої супутникової та метеорологічної інформації дає можливість встановити суміжні території із джерелами викидів, що найчастіше зазнають негативного впливу від викидів. Подібним шляхом можна оцінювати і умови перенесення високого вмісту забруднюючих речовин на заповідні та відносно чисті території України. Більшість змін, що відбудуться внаслідок перерозподілу джерел викидів на території України через воєнні дії (знищення промисловості, перерозподіл у викидах автотранспорту, поява нових джерел внаслідок руйнувань, тощо), зможуть бути виявлені подібним чином при порівнянні із базовим періодом.

Найбільшою проблемним залишається набір забруднюючих речовин за яким можна буде здійснити подібний аналіз. До розглянутих у статті речовин, можна додати лише можливість оцінки аерозольних параметрів та дуже експериментальне використання супутникових даних під час визначення вмісту метану (CH_4) [30], аміаку (NH_3) [31], тропосферного озону (O_3) [32], та подібних. Використання даних про вміст SO_2 та CH_2O, хоча і показує хороші результати виявлення максимумів концентрацій, проте не дозволяє якісно проводити оцінку низьких значень [27,28], що погіршуватиме можливості виявлення наслідків воєнних дій поза тепловими електростанціями та промисловими об'єктами на твердому паливі, а також у містах із низькими чи середніми викидами забруднюючих речовин.

4 ВИСНОВКИ

У статті встановлено особливості просторового розподілу загального вмісту NO_2, CO, SO_2 та CH_2O за даними супутникових спостережень Sentinel-5P напередодні повномасштабного російського вторгнення на територію України. Це дозволило описати базовий стан якості атмосферного повітря з повним просторовим охопленням придатним для порівняння і оцінки наслідки воєнних дій на території України.

Найзабрудненіші райони зосереджувалися навколо великих промислових міст та населених пунктів із потужними ТЕС. Так окремі осередки забрудненого повітря охоплюють наступні території: 1) Донецька область як з підконтрольними, так і окупованими з 2014 р. промисловими містами; 2) центральні райони території України вздовж р. Дніпро та навколо вже відсутнього Каховського водосховища; 3) територія, що охоплює Харків та Зміївську ТЕС у смт. Слобожанське; 4) територія, що охоплює Київ та Трипільську ТЕС в Українці; 5) територія, що охоплює Львів, Калуш, а також Бурштинську і Добротвірську ТЕС. Найчистіші території охоплюють високогірні райони у Карпатах та Криму, Полісся на півночі Житомирської та Чернігівської областей; та заповідні території Подільської височини (природний заповідник «Медобори»).

Аналіз переважаючого напрямку вітру для міст із найбільш забруднених районів дозволив встановити повторюваність за якою прилеглі території зазнаватимуть негативного впливу внаслідок атмосферного перенесення. У той же час, для відносно чистих районів встановлено закономірності формування високих рівнів забруднення. Зазвичай, найвищий вміст забруднюючих речовин над територією формується за умови значних швидкостей вітру більше 6 м/с із напрямків з основними джерелами викидів. Формування високих концентрацій за таких умов найчастіше буде відбуватися на висотах, а не в приземному шарі. На умови розсіювання забруднюючих речовин

значно впливає і висота ГША. За висоти ГША менше ніж 500 м, вміст NO_2, SO_2 та CO щонайменше вдвічі перевищує концентрації за умови висоти ГША більше 1500 м. У той же час, зворотна залежність характерна для CH_2O у зв'язку із фотохімічним утворенням домішки на висотах.

Отримані результати загального вмісту забруднюючих речовин, разом із попередньо опублікованим аналізом для приземного вмісту, дозволяє описати базовий стан якості атмосферного повітря для оцінки наслідків військових дій, та з метою розроблення заходів післявоєнного відновлення.

ПОДЯКИ

Дослідження здійснено в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України в рамках виконання науково-дослідної роботи №9/21 «Сучасні тенденції просторово-часового розподілу хімічних складових атмосфери над територією України на основі інтеграції даних вимірювань» (2021–2023 рр., номер державної реєстрації 0121U109319).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стан забруднення атмосферного повітря в Україні напередодні повномасштабного російського вторгнення. Частина 1: приземний вміст забруднюючих речовин / Савенець М. В. та ін. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. Вип. 31. С. 69-87. https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.05
2. Enhanced Capabilities of TROPOMI NO2: Estimating NOx from North American Cities and Power Plants / Goldberg D. L. et al. *Environ. Sci. Technol.* 2019. Vol. 53. Pp. 12594–12601. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04488.
3. Nitrogen dioxide (NO2) pollution monitoring withsentinel-5P satellite imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak / Virghileanu M. et al. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12(21). 3575. https://doi.org/10.3390/rs12213575
4. Tracking NO2 emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data / Saw G. K. et al. *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 259. 118514. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.1185
5. Satellite data applications for site-specific air quality regulation in the UK: Pilot study and prospects / Potts et al. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12. 1659. https://doi.org/10.3390/atmos12121659
6. High-resolution mapping of nitrogen dioxide with TROPOMI: first results and validation over the Canadian oil sands / Griffin D. et al. *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46. Pp. 1049–1060. https://doi.org/10.1029/2018GL081095
7. Sentinel-5P TROPOMI Satellite Application for NO2 and CO Studies Aiming at Environmental Valuation / Bodah et al. *J. Clean. Prod.* 2022. Vol. 357. 131960. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131960
8. Sentinel-5P TROPOMI NO2 retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data / van Geffen et al. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2022. Vol. 15. Pp. 2037–2060. https://doi.org/10.5194/amt-15-2037-2022
9. Comparison of TROPOMI NO2, CO, HCHO, and SO2 data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources in the example of Ukraine / Savenets M. et al. *Meteorological Applications*. 2022. Vol. 29(6). e2108. https://doi.org/10.1002/met.2108
10. Huang G., Sun K. Non-negligible impacts of clean air regulations on the reduction of tropospheric NO_2 over East China during the COVID-19 pandemic observed by OMI and TROPOMI. *Sci. Total Environ*. 2020. Vol. 745. P. 141023. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141023
11. Impact of COVID-19 pandemic on air pollution in Poland based on Surface Measurements and Satellite Data / Filonchyk M. et al. *Aerosol Air Qual*. 2021. Vol. 21(7). P. 200472. https://doi.org/10.4209/aaqr.200472
12. Air quality impacts of COVID-19 lockdown measures detected from space using high spatial resolution observations of multiple trace gases from Sentinel-5P/TROPOMI / Levelt P. L. et al. *Atmos. Chem. Phys*. Vol. 22. Pp. 10319–10351. https://doi.org/10.5194/acp-22-10319-2022.
13. War Impact on Air Quality in Ukraine/ Zalakeviciute R. et al. *Sustainability*. 2022. Vol.14(21). 13832. https://doi.org/10.3390/su142113832
14. Satellite spectroscopy reveals the atmospheric consequences of the 2022 Russia-Ukraine war / Chengxin Z. et al. *Sci. Total Environ*. 2023. Vol. 869. 161759. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161759
15. Air pollution mapping with nitrogen and sulfur dioxides in the south-eastern part of Ukraine using satellite data / Stankevich S. et al. *Mining Science*. 2016. Vol. 23. Pp. 21-31.
16. Comparative analysis of air quality in Kyiv by GIS and remote sensing in 2019–2020 / Babii V. et al. *Geoinformatics*. 2021. Vol. 2021. Pp.1-6. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521138
17. Savenets M. Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. *Idojaras*. 2021. Vol. 125(2). Pp. 271–290. https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.2.6
18. Putrenko V., Pashynska N. The use of remote sensing data for modeling air quality in the cities. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*. 2017. Vol. IV-5/W1. Pp. 57–62. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-W1-57-2017.
19. Evaluation of particulate matter PM2.5/PM10 air pollution in the some of Ukraine and China cities / Milinevsky G. et al. *20th EGU General Assembly. EGU2018*. 2018. Austria. P. 3844.
20. Air quality estimation using satellite and in-situ data for Kyiv city within ERA-PLANET Project / Korsunska Y. et al. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019. P.p 1032-1036. https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879843
21. Essential variables for air quality estimation/ Shelestov A. et al. *International Journal of Digital Earth*. 2020. Vol. 13(2). Pp. 278-298. https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1620881
22. HARP manual. URL: https://stcorp.github.io/harp/doc/html/index.html (Accessed: 30.08.2023)
23. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) / Hersbach H. et al. https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47
24. Seasonal and Diurnal Variation of Formaldehyde and its

Meteorological Drivers at the GAW Site Zugspitze /Leuchner et al. *Aerosol Air Qual. Res.* 2016. Vol. 16. Pp. 801-815. https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0334
25. Measurement report: Production and loss of atmospheric formaldehyde at a suburban site of Shanghai in summertime / Wu et al. *Atmos. Chem. Phys.* 2023. Vol. 23. Pp. 2997–3014. https://doi.org/10.5194/acp-23-2997-2023
26. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogendioxide / Eskes H. et al. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI): The Netherlands, 2022. 168 p.
27. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Sulphur Dioxide SO2 / Romahn F. et al. DLR, 2022. 152 p.
28. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Formaldehyde HCHO / Romahn F. et al. DLR, 2022. 122 p.
29. Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor: Carbon Monoxide Total Column Retrieval/ Landgraf, J. et al. Netherlands Institute for Space Research. 2022. 83 p.
30. Atmospheric remote sensing for anthropogenic methane emissions: Applications and research opportunities / Zhang S. et al. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 893. 164701. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164701
31. Measuring atmospheric ammonia with remote sensing campaign: Part 1 – Characterisation of vertical ammonia concentration profile in the centre of The Netherlands/ Dammers E. et al. *Atmospheric Environment*. 2017. Vol. 169. Pp. 97-112. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.067
32. Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution / Fishman J. et al. *Atmos. Chem. Phys.* 2003. Vol. 3. Pp. 893–907. https://doi.org/10.5194/acp-3-893-2003

REFERENCES

1. Savenets, M.V. et al. (2023). Status of atmospheric air pollution in Ukraine prior to the full-scale russian invasion. Part 1: ground-level content of pollutants. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 31, pp. 69-87. https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.05
2. Goldberg, D.L. et al. (2019). Enhanced Capabilities of TROPOMI NO2: Estimating NOx from North American Cities and Power Plants. *Environ. Sci. Technol.*, 53, pp. 12594–12601. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04488.
3. Virghileanu, M. et al. (2020). Nitrogen dioxide (NO2) pollution monitoring withsentinel-5P satellite imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak. *Remote Sensing*, 12(21), 3575. https://doi.org/10.3390/rs12213575
4. Saw, G.K. et al. (2021). Tracking NO2 emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data. *Atmospheric Environment*, 259, 118514. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.1185
5. Potts, D.A. et al. (2021). Satellite Data Applications for Site-Specific Air Quality Regulation in the UK: Pilot Study and Prospects. *Atmosphere*, 12, 1659. https://doi.org/10.3390/atmos12121659
6. Griffin, D. et al. (2019). High-resolution mapping of nitrogen dioxide with TROPOMI: first results and validation over the Canadian oil sands. *Geophysical Research Letters*, 46, pp.1049–1060. https://doi.org/10.1029/2018GL081095
7. Bodah et al. (2022). Sentinel-5P TROPOMI Satellite Application for NO2 and CO Studies Aiming at Environmental Valuation. *J. Clean. Prod.*, 357, 131960. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131960
8. van Geffen, et al. (2022). Sentinel-5P TROPOMI NO2 retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, pp.2037–2060. https://doi.org/10.5194/amt-15-2037-2022
9. Savenets, M. et al. (2022). Comparison of TROPOMI NO2, CO, HCHO, and SO2 data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources in the example of Ukraine. *Meteorological Applications*, 29(6), e2108. https://doi.org/10.1002/met.2108
10. Huang, G. & Sun, K. (2020). Non-negligible impacts of clean air regulations on the reduction of tropospheric NO_2 over East China during the COVID-19 pandemic observed by OMI and TROPOMI. *Sci. Total Environ,* 745, 141023. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141023
11. Filonchyk, M. et al. (2021). Impact of COVID-19 pandemic on air pollution in Poland based on Surface Measurements and Satellite Data. *Aerosol Air Qual.*, 21(7), 200472. https://doi.org/10.4209/aaqr.200472
12. Levelt, P.L. et al. (2022). Air quality impacts of COVID-19 lockdown measures detected from space using high spatial resolution observations of multiple trace gases from Sentinel-5P/TROPOMI. *Atmos. Chem. Phys.*, 22, pp.10319–10351. https://doi.org/10.5194/acp-22-10319-2022.
13. Zalakeviciute, R. et al. (2022). War Impact on Air Quality in Ukraine. *Sustainability*, 14(21), 13832. https://doi.org/10.3390/su142113832
14. Chengxin, Z. et al. (2023). Satellite spectroscopy reveals the atmospheric consequences of the 2022 Russia-Ukraine war. *Sci. Total Environ.*, 869, 161759. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161759
15. Stankevich, S. et al. (2016). Air pollution mapping with nitrogen and sulfur dioxides in the south-eastern part of Ukraine using satellite data. *Mining Science*, 23, pp.21-31.
16. Babii, V. et al. (2021). Comparative analysis of air quality in Kyiv by GIS and remote sensing in 2019–2020. *Geoinformatics*, 2021, pp.1-6. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521138
17. Savenets, M. (2021). Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. *Idojaras*, 125(2), pp. 271–290. https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.2.6
18. Putrenko, V. & Pashynska, N. (2017). The use of remote sensing data for modeling air quality in the cities. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-5/W1, pp.57–62. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-W1-57-2017.
19. Milinevsky, G. et al. (2018). Evaluation of particulate matter PM2.5/PM10 air pollution in the some of Ukraine and China cities. *20th EGU General Assembly, EGU2018,* 3844.
20. Korsunska, Y. et al. (2019). Air quality estimation using satellite and in-situ data for Kyiv city within ERA-PLANET Project. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON),* pp.1032-1036.
21. Shelestov, A. et al. (2020). Essential variables for air quality estimation. *International Journal of Digital Earth*, 13(2), pp.278-298. https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1620881
22. *HARP manual.* Available at: https://stcorp.github.io/harp/

doc/html/index.html (Accessed: 30.08.2023)
23. Hersbach, H. et al. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47
24. Leuchner, M. et al. (2016). Seasonal and Diurnal Variation of Formaldehyde and its Meteorological Drivers at the GAW Site Zugspitze. *Aerosol Air Qual. Res*, 16, pp. 801-815. https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0334
25. Wu, Y. et al. (2023). Measurement report: Production and loss of atmospheric formaldehyde at a suburban site of Shanghai in summertime. *Atmos. Chem. Phys*., 23, pp. 2997–3014. https://doi.org/10.5194/acp-23-2997-2023
26. Eskes, H. et al. (2022). *Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogendioxide*. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI): The Netherlands.
27. Romahn, F. et al. (2022). *Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Sulphur Dioxide SO2*. DLR.
28. Romahn, F. et al. (2022). *Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Formaldehyde HCHO*. DLR.
29. Landgraf, J. et al. (2022). *Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor: Carbon Monoxide Total Column Retrieval*. Netherlands Institute for Space Research.
30. Zhang, S. et al. (2023). Atmospheric remote sensing for anthropogenic methane emissions: Applications and research opportunities. *Science of The Total Environment*, 893, 164701. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164701
31. Dammers, E. et al. (2017). Measuring atmospheric ammonia with remote sensing campaign: Part 1 – Characterisation of vertical ammonia concentration profile in the centre of The Netherlands. *Atmospheric Environment*, 169, pp.97-112. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.067
32. Fishman, J. et al. (2003). Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution. *Atmos. Chem. Phys.,* 3, pp.893–907, https://doi.org/10.5194/acp-3-893-2003

STATUS OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION IN UKRAINE PRIOR TO THE FULL-SCALE RUSSIAN INVASION. PART 2: POLLUTANTS TOTAL CONTENT ACCORDING TO THE SATELLITE DATA

M. V. Savenets, L. M. Nadtochii, T. V. Kozlenko, K. M. Komisar, N. S. Zhemera

Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, 37, Nauky Pr., 03028 Kyiv, Ukraine, savenets@uhmi.org.ua

The paper describes the main features of pollutant total content distribution over Ukraine that can be used as baseline air quality data observed before the full-scale russian invasion in Ukraine. The study is based on the data derived from the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard of the Sentinel-5 Precursor (5P) satellite that indicates nitrogen dioxide (NO2), sulfur dioxide (SO2), carbon monoxide (CO) and formaldehyde (CH2O) levels. We defined the characteristics of pollutants spatial distribution with full coverage of Ukrainian territory. Despite the increasing role of automotive emissions, the most polluted air in Ukraine was still observed over large industrial cities and smaller settlements having the biggest thermal power plants (TPP). The high level of pollutants content over these locations negatively affects air quality in suburban and rural areas by the prevailing wind. They form relatively stable polluted spots over larger areas. Hence, main polluted areas include: Donetsk Region; territories in the central part of Ukraine along the Dnipro River and near the destroyed Kakhovka reservoir; Kharkiv and Zmiiv TPPs; Kyiv and Trypillia TPPs; and the territories in the western part, including Lviv, Dobrotvir and Burshtyn TPPs. The polluted air from these territories determines the air quality depending on a prevailing wind. In case of high wind speeds polluted air can be distributed from urban areas towards relatively clean territories such as Carpathian and Crimean Mountains, northern Polissia, and the Medobory National Park of Podillia. We determined quantitative parameters of wind speed and direction for every pollutant that causes higher total content over relatively clean territories. Pollutants dispersion in the atmosphere varies depending on a boundary layer height (BLH). It was found that NO2, CO and SO2 content significantly increased when the BLH was below 500 m over both urban areas and clean territories with no emission sources available. The inverse dependence on the BLH was identified for CH2O. This can be explained by a more intense photochemical production at higher altitudes. The detected baseline air pollution conditions can be used in order to assess the impact of the war on air quality in Ukraine and come up with relevant post-war development measures.

Keywords: Sentinel-5P; total content; pollution; emissions; atmospheric air.

Подання до редакції **: 09. 09. 2023**
Надходження остаточної версії **: 20. 09. 2023**
Публікація статті : **21. 12. 2023**

Ukrainian hydrometeorological journal, 2023, 32, 144-156 doi: 10.31481/uhmj.32.2023.10
ISSN 2311-0902 (print), 2616-7271 (online)

УДК 504.062

РЕСУРСОЦІННИЙ ПОТЕНЦІАЛ ПОТОКУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ОДЕСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Т. А. Сафранов, В. Ю. Приходько, Д. Ю. Яновський

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, safranov@ukr.net

Незважаючи на широке використання терміну «тверді побутові відході», в основних нормативно-законодавчих документах України використовується поняття «побутові відходи». У міжнародній практиці також немає чіткого визначення поняття «тверді побутові відходи», але є ряд пов'язаних з цим поняттям термінів. Тверді побутові відходи визначаються як відходи, які утворюються в процесі життєдіяльності людини, накопичуються в житлових будинках та установах соціальної сфери і непридатні до подальшого використання за місцем їх генерації. Для споріднених термінів, що застосовуються у зарубіжній та вітчизняній практиці, більше підходить термін – побутові відходи (*household waste*), тобто відходи, що утворюються безпосередньо в домогосподарствах. Тверді побутові відходи являють собою гетерогенну суміш складного морфологічного складу, кількісні та якісні характеристики яких не є постійними і залежать від особливостей країни, регіону, міста або селища, де вони утворилися, сезону року та інших чинників. Зростаючі обсяги твердих побутових відходів є однією із складових прогресуючого антропогенного навантаження, що створює загрозу екологічній безпеці регіонів країни та здоров'ю населення, а також негативно впливають на стан природних складових довкілля. До основних способів поводження з твердими побутовими відходами в Україні відносяться захоронення на полігонах, спалювання, переробка та утилізація. Із загального річного обсягу відходів, що утворюються на пострадянському просторі, 93% вивозять на полігони або сміттєзвалища, 4% спалюють і лише близько 3% утилізують. Тому створення і впровадження ефективної системи управління та поводження з ними є важливим завданням забезпечення екологічної безпеки і сталого розвитку регіонів країни. Крім того, тверді побутові відходи є значним резервом для отримання вторинних матеріальних ресурсів. Згідно концепції циркулярної економіки, практично всі компоненти твердих побутових відходів повинні повторно використовуватися у виробництві нової продукції, що дозволить мінімізувати негативний вплив на довкілля та раціонально використовувати природні ресурси. Проаналізований сучасний стан системи управління та поводження з твердими побутовими відходами Одеської області, а також дана оцінка їх ресурсної цінності. Без урахування ліквідності харчових та інших відходів, щороку з загального потоку ТПВ Одеської області можна отримати вторинну сировину на суму майже 1,4 млн гривень. У разі створення ефективної системи поводження з харчовими та іншими органічними відходами цей показник може бути істотно збільшений. Відокремлення і використання ресурсоцінних компонентів із загального потоку твердих побутових відходів буде сприяти зменшенню техногенного навантаження на природні складові довкілля і поліпшенню екологічної ситуації на території Одеської області.

Ключові слова: тверді побутові відходи; ресурсоцінні компоненти; роздільний збір; поводження, утилізація.

1 ВСТУП

Накопичення відходів у довкіллі, яке особливо інтенсивно відбувається в останні 50-100 років, стало представляти глобальну екологічну проблему, наслідками якої є негативний вплив на довкілля, отже, й на стан здоров'я населення. На сьогодні у світі обсяг утворення твердих відходів становить 11,2 млрд т, із яких на тверді побутові відходи (ТПВ) припадає 400 млн т (біля 57 кг на людину) [1]. В країнах з розвиненою економікою цей показник ще вище і сягає 340-700 кг відходів на душу населення, але з падінням рівня добробуту він знижується. Однак в Україні, яку все частіше відносять до країн, що розвиваються, цей показник наближається до показників країн-світових економічних лідерів і становить 270 кг на душу населення країни [2]. Враховуючи це, зазначимо, що проблеми ефективного

управління та поводження з ТПВ залишаються актуальними як для України, так і для інших країн світу.

Зростаючі обсяги ТПВ є однією із складових прогресуючого антропогенного навантаження, що створює загрозу екологічній безпеці регіонів України та здоров'ю населення, а також негативно впливає на стан природних складових довкілля, зокрема на геологічне середовище, ґрунтовий покрив, підземні (ґрунтові) та поверхневі води, повітряний басейн, живі організми та середовище їх існування. Тому створення і впровадження ефективної системи управління та поводження з ТПВ є важливою задачею забезпечення екологічної безпеки і сталого розвитку регіонів країни. У той же час, ТПВ є значним резервом для отримання вторинних матеріальних ресурсів (ВМР). Враховуючи важливість переробки ресурсоцінних компонентів ТПВ, основним завданням у сфері управління та поводження з ними стає підвищення ефективності системи збору та переробки. ТПВ містять цінні компоненти (метали, скло, полімери, органічні речовини тощо), а також є потенційним джерелом отримання енергії. Досвід розвинених країн показує, що при сортуванні змішаних відходів можна отримати до 20% товарної вторинної сировини, придатної для промислової переробки, ще до 35% можна закомпостувати. Проблема утилізації ресурсоцінних компонентів ТПВ у регіонах України набуває все більш гострого характеру, у зв'язку з безперервним зростанням обсягів відходів, що генеруються при низьких рівнях їх утилізації.

У чинному Класифікаторі відходів ДК 005-96 [3] такого терміну, як «тверді побутові відходи», немає. Однак у Законі України «Про управління відходами» [4] та в «Національній стратегії управління відходами до 2030 року» [5] є термін «побутові відходи», тобто це змішані та/або роздільно зібрані відходи від домогосподарств, включаючи відходи паперу, картону, скла, пластику, деревини, текстилю, металу, упаковки, біовідходи, відходи електричного та електронного обладнання, відходи батарей та акумуляторів, небезпечні відходи у складі побутових, великогабаритні та ремонтні відходи, а також змішані та/або роздільно зібрані відходи з інших джерел, якщо ці відходи подібні за своїм складом до відходів домогосподарств. Таке визначення прийшло на зміну використовуваному у Законі України «Про відходи» (1998), який втратив чинність. В цьому законі побутові відходи – це відходи, що утворюються в процесі життєдіяльності людини в житлових та нежитлових приміщеннях і не використовуються в місцях їх накопичення. Крім того, у цьому ж Законі є визначення терміну «тверді відходи» — залишки речовин, матеріалів, предметів, виробів, товарів, продукції, які не можуть надалі використовуватись за призначенням. У міжнародній практиці також немає чіткого визначення поняття «тверді побутові відходи», але є ряд пов'язаних з цим поняттям термінів. Так, в ОЕСР використовується поняття «тверді відходи», які включають міське сміття, промислові та комерційні відходи, осад стічних вод, відходи сільськогосподарських і тваринницьких операцій та іншої пов’язаної діяльності, відходи знесення та залишки шахтних робіт [6]. Це визначення можна вважати узагальненою класифікацією відходів певної консистенції за джерелами виникнення. У свою чергу такими джерелами, на думку деяких авторів, є: домогосподарства; комерційні установи (магазини, ресторани тощо); установи (школи, лікарні, державні установи); підприємства, які виробляють різні види продукції; підприємства, які здійснюють діяльність у сфері сільського господарства та тваринництва. Крім того, проводять різницю між відходами домогосподарств, які описуються як будь-які відходи, що утворюються в домогосподарствах, і муніципальними відходами, які вони визначають як будь-які відходи, які збираються муніципальними системами збору сміття. Загалом, таке визначення терміну «муніципальні тверді відходи» у зарубіжній науковій літературі є поширеним. Визначення терміну «тверді муніципальні відходи» (*municipal solid waste*) звичайно конкретизується (сміття, зібраного комунальними санітарними службами; непридатні для подальшого використання предмети споживання і т.д.), а іноді вони доповнюються будівельним сміттям, а також твердим осадом з міських очисних споруд, медичними відходами, відпрацьованими автомобілями тощо. Спільним є те, , що поводження з ними було обов'язком місцевих органів влади – муніципалітетів (звідки і назва). Міжнародними організаціями, зокрема, ЮНЕП ООН та ОЕСР, наводиться таке визначення муніципальних відходів. Муніципальні відходи є відходами, що збираються муніципалітетами або за їх дорученням із залученням приватних або державних служб, включаючи відходи, генеровані домашніми господарствами,

комерційним і торговими підприємствами, дрібним бізнесом, конторськими і іншими установами (школи, лікарні, державні установи). Сюди також відносяться великогабаритні відходи (наприклад, предмети домашнього ужитку, старі меблі, матраци) і відходи окремих муніципальних служб, зокрема сміття, що збирається в садово-паркових зонах і на вулицях (вуличне сміття, вміст сміттєвих урн, сміття в місцях ринкової торгівлі), якщо він класифікується як відходи. Це визначення не поширюється на відходи муніципальної каналізаційної мережі та її очисних споруд, муніципального будівництва і зносу будівель.

В українській практиці до складу ТПВ включаються лише відходи, що утворюються в процесі життєдіяльності людини в житлових та нежитлових приміщеннях, що по суті є еквівалентом поширеного у зарубіжній практиці терміну — побутові відходи (*household waste*), тобто відходи, що утворюються безпосередньо в домогосподарствах. Але навіть у цьому випадку не буде повної відповідності між цими термінами, оскільки в зарубіжних країнах до складу побутових відходів не включаються відходи, що утворюються в офісних приміщеннях, школах тощо. Отже, поняття «тверді побутові відходи», що застосовується в Україні, займає проміжне положення між термінами «побутові відходи» і «тверді муніципальні відходи», що використовуються у світі, — воно ширше першого терміну. Дане зауваження є суттєвим, оскільки, наприклад, у деяких вітчизняних нормативних документах та науково-практичних дослідженнях вважалося, що поняття «тверді побутові відходи» та «муніципальні тверді відходи» є рівнозначними [7, 8].

Враховуючи зазначене, а також чинні в Україні основні нормативно-законодавчі акти [3,4], Гаркущенко О.Н. пропонує, наприклад, таке визначення терміну «тверді побутові відходи» — відходи переважно у твердій формі (не рідкій та не газоподібній), що утворюються в процесі життєдіяльності людини в житлових та нежитлових приміщеннях, що є залишками матеріалів, предметів, виробів, товарів, продукції, які не можуть надалі використовуватися за своїм призначенням у місцях їх накопичення та не пов'язані з виробничою діяльністю підприємств [7].

Щодо правового регулювання сфери поводження з ТПВ в Україні в цілому, то в країні існує низка документів, які встановлюють певні рамки для економічних агентів. Основним документом у цій сфері є Закон України «Про управління відходами» [4], який визначає термінологію сфери управління відходами, основні цілі та принципи державної політики з управління відходами тощо. Розбудова ефективної системи управління відходами ґрунтується на принципах «ієрархії управління відходами», наближення до циркулярної економіки, принципах розширеної відповідальності виробника (РВВ) та «забруднювач платить». В Законі наголошується про необхідність створення конкурентного середовища в сфері управління відходами. Однак такі терміни, як терміни «тверді побутові відходи», «утилізація», «поводження з відходами» у цьому Законі не визначено.

ТПВ являють собою багатокомпонентну суміш різних матеріалів і органічних продуктів, що мають різні розміри і відрізняються за хімічними та фізичними властивостями. Поводження з ТПВ в Україні, в більшості випадків, включає лише їх збирання та транспортування на полігон для захоронення. Утилізація відходів без попереднього сортування майже неможлива, тому їх слід спочатку диференціювати по групах, а потім кожну з них переробити. До складу ТПВ входять: харчові відходи (овочі, фрукти, відходи садівництва тощо); папір та картон; полімери (пластик, пластмаси); скло; чорні метали; кольорові метали; текстиль; дерево; небезпечні відходи (батарейки, сухі та електролітичні акумулятори, тара від розчинників, фарб, ртутні лампи, телевізійні кінескопи тощо); кістки, шкіра, гума; залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів (дрібне будівельне сміття, каміння, вуличний відсів тощо).

Для успішного управління ТПВ в Україні необхідно продовжити роботи з вивчення їх властивостей, спираючись на досвід попередніх досліджень у цій галузі. На кількість компонентів, як і на морфологічний склад відходів, істотно впливають такі чинники, як рівень соціально-економічного розвитку, характер забудови, рівень розвитку торгівлі і громадського харчування, національні традиції, впровадження елементів роздільного збирання, кліматичні та інші особливості місцевості, сезон року та ін. У зв'язку з цим визначається складна просторово-часова диференціація морфологічного складу відходів не тільки всередині країни, а й в межах регіону.

До основних технологій поводження з ТПВ в Україні відносяться захоронення на полігонах ТПВ, спалювання, рециклінг та відновлення. Із

загального річного обсягу відходів, що утворюються на пострадянському просторі, 93% вивозять на полігони або сміттєзвалища, 4% спалюють і лише близько 3% утилізують. У ЄС такі статистичні показники зовсім інші: на полігони направляють до 40 % загальної маси зібраних ТПВ, переробляють близько 40 %, інші відходи спалюють. За даними Мінвідновлення, у 2022 р. перероблено та утилізовано близько 9,9% побутових відходів, з них: 1,66% спалено, а 8,24% побутових відходів потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні лінії.

Ліквідація ТПВ, зібраних у спеціальні контейнери, шляхом захоронення на полігонах і звалищах завдає суттєвої шкоди навколишньому природному середовищу (НПС). Рідкі продукти розкладання ТПВ проникають у нижні шари ґрунту та розносяться ґрунтовими водами, транспортуючи різні токсини, патогенну мікрофлору, солі важких металів та інші забруднюючі речовини (ЗР) [9]. У повітря надходять продукти біохімічного розкладання органічної складової ТПВ – метан, вуглекислий газ, сірководень, а також, в окремих випадках, продукти термічної деструкції відходів.

Спалювання ТПВ також супроводжується суттєвим впливом на довкілля, зокрема, викидами в атмосферне повітря широко спектру ЗР від термічного розкладання різноманітних компонентів в складі відходів. До того ж, утворюються залишки процесу спалювання (20-30% за масою). Спалювання відходів не знищує їх повністю, а лише зменшує в об'ємі та збільшує в токсичності, після чого відходи спалювання необхідно захоронювати на спеціальному полігоні для небезпечних відходів. Це свідчить про необхідність сортування ТПВ перед спалюванням з видаленням токсичних та негорючих складових і, за можливості, подавати на спалювання висококалорійну фракцію ТПВ. Вологовміст ТПВ нерідко перевищує 40%, знижуючи теплотворну здатність відходів, що утилізуються. Для повнішого використання теплоти доцільно висушувати їх перед спалюванням.

Відносно безпечним методом утилізації ТПВ є піроліз при високих температурах (1200-1500 °С). Він дозволяє не тільки отримати теплову енергію в процесі утилізації, але і розкласти різні ЗР на безпечні елементи. Наприклад, запаси непридатних для подальшого використання пестицидів та інші токсикантів можна знищити за вказаної температури з мінімальною шкодою для довкілля [10, 11].

У 2017 році в Україні ухвалили «Національну стратегію управління відходами до 2030 року» в рамках Угоди про Асоціацію з ЄС. Цілі Стратегії відповідають вимогам низки Директив ЄС. Вони включають певні вимоги до стандартів виробництва продукції, переробки відходів, дизайну упаковки тощо. Так, наприклад, до 2030 року в Україні мають переробляти 70% усіх упаковок, що виходять на ринок, 55% пластику, 85% паперу та картону. Отже, до 2030 року планують створити 800 нових потужностей із переробки вторинної сировини, утилізації та компостування біологічних відходів. Обсяг захоронення ТПВ до 2030 року має зменшитися з 95% до 30%, а загальний обсяг захоронених відходів – з 50% до 35%. Крім того, в Україні буде діяти мережа з 50 регіональних полігонів, які відповідатимуть вимогам Директиви ЄС. Наразі в Україні всього понад 6 тис. сміттєзвалищ та полігонів загальною площею майже 9 тис. га. З них понад тисячу полігонів та звалищ або перевантажені, або не відповідають нормам безпеки. Додатково в країні потрібно створити ще понад 300 полігонів. Як зазначено в [5], сучасні способи управління побутовими відходами в Україні орієнтовані на полігонне захоронення відходів, розміщення на сміттєзвалищах, більшість з яких не відповідають вимогам екологічної безпеки; мають низький рівень технологічного оснащення.

Система управління та поводження з ТПВ повинна ґрунтуватися на принципах циркулярної економіки, тобто моделі виробництва та споживання, яка включає спільне використання, лізинг, повторне використання, ремонт, переобладнання та переробку матеріалів і продуктів упродовж тривалого періоду часу.

Директива 2008/98 ЄС «Про відходи і скасування деяких директив» встановлює так звану «ієрархію управління відходами»: 1) *запобігання утворенню відходів* → *2) підготовка до повторного використання* → *3) рециклінг;* → *4) інші операції з відновлення (у т. ч. відновлення з одержанням енергії* → *5) видалення*. Найкращим є перший рівень «запобігання (попередження) утворення відходів»; за ним іде підготовка до повторного використання; наступні рівні – рециклінг або їх відновлення. Останній, найменш бажаний, варіант – це захоронення відходів на звалищах та полігонах. До нього, як правило, вдаються лише тоді, коли нічого іншого не можна вдіяти. Крім цього, виділяють ще такий рівень як

спалювання. У рамках циркулярної економіки енергія від спалювання має використовуватися з користю, наприклад, для опалення будівель. В іншому випадку сміттєспалювання являє собою найменш прийнятний варіант управління ТПВ. Для повної термінологічної ясності, слід нагадати, що згідно Директиви 2008/98/ЄС: запобігання утворення відходів – необхідність розробки матеріалів, товарів та послуг таким чином, щоб при їх виробництві, використанні, повторному використанні та рециклінгу, а також при видаленні після закінчення терміну їхньої служби утворювалося якнайменше відходів; повторне використання – будь-яка операція, за допомогою якої продукти або компоненти, що не стали відходами, знову використовуються для тієї ж самої мети, на яку вони були спочатку проведені; рециклінг – будь-яка операція, при якій матеріал відходів переробляється в продукти, матеріали або субстанції незалежно від того, чи продукт, отриманий в результаті, служить своїм початковим або будь-яким іншим цілям. По всьому світу місцеві уряди та екологічні агенції зробили запобігання відходам своїм пріоритетом. До порядку денного увійшли принципи «мінімізувати», «знову використовувати» та «рециклювати» (так звані 3*R – reduce, reuse ma recycle*).

Проблема ТПВ на сьогодні є досить актуальною для України, обсяги утворення яких постійно зростають. За даними Мінвідновлення, в 2022 р. 90% відходів були захоронені, перероблено та утилізовано близько 9,9% побутових відходів, з них: 1,66% спалено, а 8,24% побутових відходів потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні лінії. Послугами вивезення відходів охоплено лише близько 80% населення України.

Домінуючим методом поводження з відходами було захоронення на полігонах і звалищах. Так, за даними Мінвідновлення, у 2022 році в населених пунктах України утворилось майже 39 млн м^3 побутових відходів, або понад 7 млн. тон, які захоронюються на 5,7 тис. сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 8 тис. га. В Україні на сьогодні налічується приблизно 5470 полігонів та звалищ, з них 2,8% перевантажено, а 12% не відповідають вимогам екологічної безпеки. Насправді, за оцінками експертів, європейським вимогам не відповідають понад 99% полігонів. Через недосконалу систему поводження з відходами 14,7 тис. несанкціонованих звалищ, площею 0,6 тис. га, з яких за останні роки було ліквідовано 12,4 тис. площею 0,36 тис. га. Недосконаліть системи роздільного збирання ТПВ призводить до втрати мільйонів тон ресурсоцінних матеріалів, які є у відходах.

Наведемо дані щодо вмісту ресурсоцінних компонентів у ТПВ окремих міст України (табл. 1).

Заслуговують уваги результати диференціації складу ТПВ відходів Львова [12]:

І. *Ресурсоцінні відходи,* які станом на поточний рік можна здати в пункти прийому міста Львова і отримати за них оплату (на них є попит від заготівельників, оскільки далі їх постачають на переробку на виробництва; такий перелік складається на основі даних від компаній заготівельників вторинної сировини і періодично оновлюється). Це: *а) пластик* (PET-пляшки, поліетиленові пакети та плівка LDPE та HDPE, твердий пластик HDPE, поліпропіленова тара); до речі, не все пакування, що виготовлене з ПЕТ-у, приймають у пунктах прийому,

Таблиця 1 – Частка ресурсоцінних компонентів у морфологічного складу ТПВ окремих міст України
Table 1 – The share of resource-value components in the morphological composition of MSW in selected Ukrainian cities

Місто Київ						
Харчові відходи	Папір та картон	Скло	Полімери	Метали	Дерево	Текстиль
35%	10%	10%	7%	1%	1%	0,5%
Місто Львів						
57,6	6,64	5,54	15,04	1,99	0,44	5,40
Місто Одеса						
29,53	4,82	12,39	13,08	0,92	1,42	3,55
Місто Полтава						
49,7	2,80	6,30	29,40	2,10	0	4,80
Україна						
39%	13%	13%	7%	1%	1%	2%

наприклад, яєчні лотки чи інший одноразовий пакувальний посуд не приймають, оскільки вони складно переробляються і не мають попиту для подальшої переробки; для РЕТ-пляшок також є обмеження: найбільш ресурсоцінними є прозорі та прозоро-кольорові пляшки (блакитні, зелені, коричневі) з-під напоїв, менш ресурсоцінними – інших відтінків та непрозорі пляшки з-під напоїв (білі та кольорові, а також флакони з-під миючих засобів); *б) метали* (жерстяні та алюмінієві банки, аерозолі); *в) скло* (оборотне і необорне); *г) комбінована упаковка* («Tetra Pak»); *д) папір та картон*; *е) органічні відходи* (що можуть перероблятися на станції компостування органічних відходів (біорозкладні пакети, харчові відходи, садово-паркові відходи, дрібна деревина, зелені відходи, а також паперові кухонні серветки та рушнички); *ж*) *небезпечні відходи* – люмінесцентні та «економні» лампи, ртутьвмісні термометри, батарейки та акумулятори, медичні відходи (голки, медичні препарати, ампули) тощо, банки з-під лакофарбових виробів, відходи електронного та електричного обладнання.

II. *Нересурсоцінні відходи*, які на сьогодні не мають матеріальної переробки (наприклад, так званий «шуршик», тобто поліпропіленова упаковка з напиленням, упаковка від макаронів чи круп (тверді скрипучі пакети), а також ПЕТ білого кольору і контейнери від їжі зі спіненого чи неспіненого полістиролу; у цій категорії також текстиль і старий одяг, недопалки цигарок, пачки від цигарок (останні, крім паперу, містять ще фольгу і пластикову обгортку, які складно розділити для подальшої переробки), тюбики з-під паст, кремів, комбінована упаковка дойпак, поролонові мочалки, інші шматинки, термоскло, новорічні кульки, кераміка, одноразові пластикові засоби (станки для гоління), зубні щітки, наповнювачі для туалетів тварин, пінопласт, дрібні будівельні відходи та вуличний відсів (пісок, дрібні елементи, що залишаються після прибирання прибудинкової території).

Відокремлену категорію складають *санітарні відходи (засоби особистої гігієни)* – підгузки, засоби менструальної гігієни, вологі серветки, маски, рукавички, паленки, ватні палички та диски; вони не переробляються; споживачі викидають їх у контейнер зі змішаними відходами, і вони можуть становити епідеміологічну небезпеку при контакті з людьми.

Найбільшу частку за масою складають органічні відходи – 60%, ресурсоцінні – 20%, нересурсоцінні – майже 15%, засоби гігієни – 4,2% – небезпечні відходи – менше 1%. А за об'ємом очікувано переважають полімери [12].

Метою даної статті є оцінка ресурсного потенціалу потоку ТПВ Одеської області та аналіз можливих шляхів його використання. *Об'єктом дослідження* є сфера управління та поводження з ресурсоцінними компонентами ТПВ в Україні, а *предмет дослідження* – сучасний стан сфери управління та поводження з ресурсоцінними компонентами ТПВ в Одеській області.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вихідними даними дослідження є інформація щодо обсягів утворення ТПВ та ресурсоцінних компонентів в їх потоці у межах окремих кластерів на території Одеської області за даними «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року», розробленого ТОВ «Укрресурс-2011». Методологія дослідження пов'язана з обробкою, аналізом та узагальненням даних, синтезом та інтерпретацією отриманої інформації щодо обсягів утворення ресурсоцінних компонентів ТПВ Одеської області.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

За даними «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року» протягом року на території Одеської області утворюється 724467,05 т ТПВ, які нерівномірно розподілені по окреслених кластерах поводження з ТПВ (рис. 1): I кластер (північні райони області); II кластер (північно-східні райони області) – 57484,87 т; III кластер (райони, що прилеглі до Одеської промислово-міської агломерації) – 473885,38 т; IV кластер (західні райони області) – 69771,17 т; V кластер (південно-західні райони області) – 70312,46 т. Як бачимо, основна частка утворення ТПВ припадає на III кластер, який охоплює територію Одеської промислово-міської агломерації та прилеглі райони.

Дані щодо обсягів утворення ресурсоцінних компонентів ТПВ Одеської області наведені у табл. 2.

В «Національній стратегії управління відходами до 2030 року» [5] пропонується

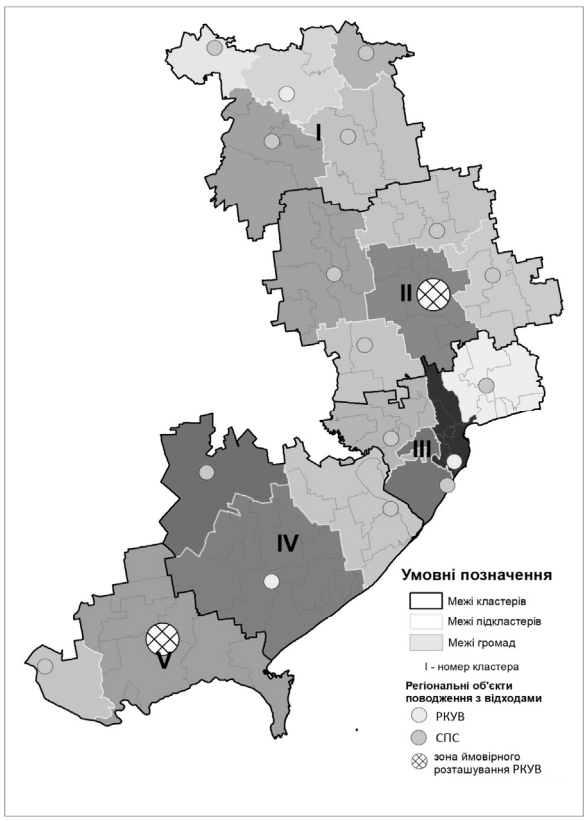


Рис. 1 – Кластери управління твердими побутовими відходами на території Одеської області
Fig. 1 – Solid waste management clusters in Odesa region

запровадження роздільного збирання та поводження з окремими компонентами ТПВ, виконання зобов'язань виробниками та імпортерами шляхом застосування принципу РВВ. Отже, першим кроком підготовки до повторного використання є сортування. Яка саме сировина вилучається в результаті сортування ТПВ визначається потребами ринку. Наприклад, об'єднання «Укрвторма» [13] здійснює заготівлю такої вторинної сировини: картон марки МС5; макулатура МС7; ПЕТ пляшка (біла, коричнева, блакитна, зелена, з-під масла); плівка високого тиску; плівка низького тиску; плівка (стрейч); пластик асорті; пінопласт (полістирол); склобій; упаковка «Tetra Pak»; металобрухт; деревина; гума; текстиль. Потужності для переробки роздільно зібраних відходів в Україні (станом на 2018 рік) становили: *макулатура* – 17 підприємств, виробнича потужність – 1200 тис. т, використання потужностей – 92%; *полімери* – 39 підприємств, виробнича потужність – 260 тис. т, використання потужностей – 65,4%; *PETE-пляшки* – 19 підприємств, виробнича потужність – 77 тис. т, використання потужностей – 65%; склобій – 16 підприємств, виробнича потужність – 800 тис. т, використання потужностей – *60,2%* [13].

Таблиця 2 – Обсяги утворення ресурсоцінних компонентів твердих побутових відходів Одеської області, т/рік (Регіональний план управління відходами в Одеській області до 2030 року)
Table 2 – Volumes of generation of resource-value components of municipal solid waste in Odesa region, tonnes per year (Regional Waste Management Plan for Odesa region until 2030)

Кластер	Метали		Текстиль	Дерево	Небезпечні відходи	Кістка, шкіра, гума	Упаковка комбінована	Залишок
	чорні	кольорові						
I	12443,7	276,76	1199,45	1077,58	252,86	1418,89	375,60	18364,96
II	1275,25	265,49	1103,06	966,59	259,85	2382,94	318,17	17559,10
III	4536,03	1429,74	17455,75	10185,32	2385,33	10202,79	4461,19	149967,09
IV	1656,49	347,69	1452,30	1276,76	337,47	1807,35	425,55	23003,42
V	1411,04	329,72	1469,77	1341,42	286,35	1671,57	483,69	21927,53
Всього	**21322,51**	**2649,40**	**22680,33**	**14847,67**	**3521,66**	**109483,54**	**6064,20**	**230822,10**

Кластер	Харчові відходи	Папір та картон	Скло	Відходи пластикових матеріалів			
				Всього	PETE(тара для напоїв)	LDPE (плівка, пакети)	Інші види (PEHD, PVC, PS)
I	122247,27	784,37	12741, 24	6498,89	2277,76	2341,80	1879,33
II	11044,74	2394,72	1192,72	5507,01	1924,12	2020,06	1562,85
III	131162,36	21598,96	60155,32	60356, 33	18509,17	22572,27	19301,65
IV	14578,76	1878,40	15673,64	2562,45	2562,45	2682,48	2085,94
V	15195,02	2398,24	15427,39	8367,25	2937,77	2984,31	230822,10
Всього	**294228,15**	**29054,69**	**105100, 31**	**83291,93**	**28211,27**	**32600,9247**	**24911,87**

За даними [14], частка переробки ресурсоцінних компонентів складає: макулатури – 28%, пластику – 35%, металів – 1%, скла – 14%, текстилю – 18%. Сценарії збирання ТПВ ґрунтуються на аналізі поточної ситуації на території Одеської області. У «Регіональному плані управління відходами в Одеській області до 2030 року» в основу системи збирання відходів в покладена наступна технологічна схема: 1) зелений контейнер для скла; 2) жовтий контейнер для «сухої» вторинної сировини; 3) сірий контейнер для залишкових (змішаних) відходів. Як вказано вище, домінуючим компонентом ТПВ є харчові відходи. Під час їх розкладання відбувається збільшення у складі ТПВ вологої та гниючої маси, яка не підлягає сортуванню та забруднює інші ресурсоцінні компоненти. При цьому, якщо мешканці забезпечать роздільне збирання у джерела утворення ТПВ, а саме безпосередньо у квартирах або домоволодіннях, можливо відібрати близько 70% умовно чистих ресурсоцінних компонентів.

Для запобігання зниженню якості ресурсоцінних компонентів ТПВ відділення органічної складової повинно відбуватися в мінімально короткі терміни після її утворення. Можливі такі варіанти досягнення необхідної умови: 1) відділення органіки, що легко розкладається, від загального потоку в момент утворення за допомогою її подрібнення в діспоузері з подальшою переадресацією в систему каналізації; 2) вилучення за рахунок компостування, збродження і/або вермикультивування за місцем утворення; 3) виділення органічної фракції із загального потоку ТПВ шляхом організації «роздільного збору» (диференціації) за місцем утворення з переадресацією на підприємства з промислового виробництва біоорганічної продукції. Перший варіант не призводить до використання ресурсного потенціалу харчових відходів, а лише переводить їх на очисні споруди. Другий варіант має локальне та обмежене застосування. Третій варіант дозволяє максимально повно використати ресурсний потенціал харчових відходів.

Після виконання процедури відділення органічної фракції, яка легко розкладається, залишається потік відходів, що являє собою стабілізовану суміш потенційних вторинних матеріальних ресурсів, кондиційність яких може бути збережена до моменту сортування на сміттєсортувальному підприємстві і подальшої утилізації. Збирання відходів теж має відбувається у 2 типи контейнерів – для «сухого» (суміш стабілізованих потенційних вторинних ресурсів) та «мокрого» (органічна фракція) потоків. Можлива установка і 3-го контейнера – для суміші небезпечних відходів, але, на нашу думку, раціональніше налагодити «адресний» збір таких відходів. До налагодження такої системи вилучення небезпечних відходів повинне здійснюватися на сортувальних підприємствах.

Можна урахувати досвід Львова, де встановлено 1658 контейнерів для збору органічних відходів розташовані на 1515 локаціях. Контейнери для органічних відходів встановлені практично на кожному сміттєвому майданчику, Мешкаців просять сортуввати харчові відхода вдома та викидати їх без пакетів і залишків іншого сміття в окремий контейнер. Така можливість є у 99% мешкаців міста. Компостуванням органічних відходів (харчові та садові відходи, листя, гілля), які від мешканців приймають безкоштовно, у Львові займається ЛКП «Зелене місто». На станції компостування у Львові поблизу території майбутнього сміттєпереробного заводу переробляють органічні відходи на компост, але спочатку їх зважують, сортують, подрібнюють, знезаражують та стерилізують компостконтейнерах при температурі до 72-80°С. Оскільки в Одеській області немає таких компостконтейнерів, то до початку відокремлення органічних відходів від загального потоку ТПВ, їх треба спорудити.

Переваги та недоліки недиференційованих (змішаних) і диференційованих (роздільно зібраних) ТПВ наведені в табл. 3 [13].

Можна орієнтуватися на основні правила сортування відходів в Україні (табл. 4). Основні недоліки та переваги збирання різних видів вторинної сировини в Одеський області наведені в табл. 5.

На підставі даних, наведених в табл. 2, дана приблизна вартісна оцінка окремих ліквідних видів вторинної сировини (табл. 6, 7). Як бачимо з даних, наведених в табл. 6, при відокремленні окремих видів ресурсоцінних компонентів з загального потоку ТПВ Одеської області протягом року можна отримати чорних металів на 63967,53 гривень, кольорових металів – на 66235,0 гривень, скла (склобою) – на 66235,0 гривень на 60145,99 гривень.

Таблиця 3 – Переваги і недоліки недиференційованих (змішаних) і диференційованих (після роздільного збирання) ТПВ

Table 3 – Advantages and disadvantages of undifferentiated (mixed) and differentiated (after separate collection) MSW

ПЕРЕВАГИ	НЕДОЛІКИ
Недиференційовані (змішані) ТПВ	
Нижній рівень необхідних інвестиційних витрат (непотрібні додаткові контейнери); непотрібні зусилля з боку населення.	Зазвичай досягається дуже низький рівень вилучення ресурсоцінних компонентів (5-10%); високий ступінь забруднення відібраних ресурсоцінних компонентів; економічна нерентабельність; технічні складнощі; гігієна праці.
Диференційовані (роздільна зібрані) ТПВ	
Потенціал для досягнення високих темпів вилучення вторинної сировини; висока якість вилучення вторинної сировини; створення робочих місць; може виховати почуття «екологічного громадянства»; частина операційних витрат може компенсуватись за рахунок доходів від продажу ресурсоцінних компонентів ТПВ.	Інвестиційні витрати (сміттєвози, контейнери, лінії сортування відходів тощо); необхідність високого рівня участі та дисципліни з боку населення; необхідність високого рівень освіти та підвищення обізнаності населення; необхідність моніторингу використання контейнерів, призначених для роздільного збирання ТПВ на вулицях та житлово-комунальних господарствах.

Таблиця 4 – Основні правила сортування деяких відходів в Україні [15]

Table 4 – Basic rules for sorting certain wastes in Ukraine [15].

Вид відходу	Полягає переробці	Підготовка	Не полягає переробці і прийманню
Папір, картон	Картон, офісний папір, газетно-журнальна продукція, зошити, альбоми, листівки, паперове пакування тощо	Утрамбувати в плоский вигляд, покласти в окремий пакет	Чеки, серветки, одноразові паперові стаканчики, забруднений їжею, жиром та рідиною папір
Метал	Алюмінієві і консервні банки, металеві кришки	Промиті консервні банки; алюмінієві максимально ущільнені (скласти в окремий в окремий пакет)	Радіоактивні метали, акумулятори, батареї, енергозберігаючі лампи
Скло	Цілі і біті пляшки з-під напоїв, лаків, косметики	Промиті від напоїв пляшки (скласти в окремий в окремий пакет і зав'язати)	Дзеркала, кришталь, армоване і жаростійке скло, скло від смартфонів і планшетів
Пластикове пакування	PE та PETE-пляшки, контейнери для їжі, флакони PP, пластикові кришки, пакування для соків та молочної продукції	Варто промити пакування з-під продукції, молока та соків і ущільнити, щоб стало плоским	Якщо на пакуванні немає маркування (коду переробки) – викидати в змішані відходи

Таблиця 5 – Основні недоліки та переваги збирання різних видів вторинної сировини з потоку ТПВ в Одеській області

Table 5 – The main disadvantages and advantages of collecting different types of recyclable materials from the MSW stream in Odesa region

Вид вторинної сировини	Основні переваги	Основні недоліки
Папір та картон	Легкі для сортування, велика маса по відношенню до загального потоку ТПВ, переважно чиста при відносно якісному сортуванні	Потребує багато місця у пунктах збору і тимчасового зберігання та значних витрат на перевезення
Скло, склобій змішаний	Один з найпоширеніших видів сировини, що збираються мешканцями, простий у сортуванні	Потребує багато місця для зберігання, специфічних правил транспортування та зберігання; значні витрати на перевезення; низький фінансовий еквівалент
Алюмінієва бляшанка	Висока вартість сировини	Недостатня якість сировини через забрудненість залишками солодких або алкогольних напоїв; відсутність культури спресовування даного типу відходів перед викиданням
Залізна бляшанка, брухт чорних металів	Легкість і сортуванні в побуті за умови наявності магніту	Низька вартість, недостатня якість сировини через забрудненість залишками продуктів харчування
Пляшка PE + PETE	Значна кількість використаних пляшок у побуті; легкість миття даного типу відходів перед здачею	Потребує багато місяця у пунктах збору та зменшення об'єму пляшки перед здачею шляхом спресовування, культура якого відсутня
Кришки HDPE (загальний потік)	Значна кількість використаних пляшок у побуті; легкість у сортуванні; відносно чистий потік відходів	Мала вага однієї кришечки; необхідність масштабного збору; логістичні витрати
Кришки HDPE (відсортований потік)	Висока вартість; наявність покупця даного ресурсу в Україні; значна кількість використаних кришечок у побуті; легкість у сортуванні; відносно чистий потік відходів	Мала вага однієї кришечки; необхідність масштабного збору; логістичні витрати; необхідність організації сортування кришечок за кольорами

Таблиця 6 – Орієнтовна вартість окремих видів вторинної сировини, які можна вилучити з потоку ТПВ Одеської області

Table 6 – Estimated cost of certain types of recyclable materials that can be localized from the MSW stream in Odesa region

Чорні метали		**Кольорові метали**		**Папір та картон**		**Скло**	
Кластер	Вартість	Кластер	Вартість	Кластер	Вартість	Кластер	Вартість
I	37331,10	I	6919,00	I	4784,66	I	7644,74
II	3825,75	II	6637,25	II	14607,79	II	7151,63
III	13608,09	III	35743,50	III	131753,70	III	36093,19
IV	4969,47	IV	8692,25	IV	11458,24	IV	9404,18
V	4233,12	V	8243,00	V	14629,26	V	9256,43
Всього	**63967,53**	**Всього**	**66235,00**	**Всього**	**177233,65**	**Всього**	**60145,99**

Таблиця 7 – Орієнтовна вартість окремих видів відходів пластикових матеріалів з потоку ТПВ Одеської області

Table 7 – Estimated cost of certain types of waste plastic materials from the MSW stream of Odesa region

PETE (тара для напоїв)		**PETE (плівка, пакети)**		**Інші види ВПМ (PEHD, PVC, PS)**	
Кластер	Вартість	Кластер	Вартість	Кластер	Вартість
I	14805,44	I	46836,00	I	939,67
II	12506,78	II	40401,20	II	781, 43
III	120309,60	III	451445,4	III	9650,83
IV	16655,93	IV	53649,60	IV	1042,97
V	19095,51	V	59686,20	V	115411,10
Всього	**183373,26**	**Всього**	**653818,40**	**Всього**	**127826,00**

Набагато вище вартість окремих ВПМ у загальному потоці ТПВ (табл. 7): PETE (тара від напоїв) – 183373,26 грн/рік; PETE (плівка, пакети) – 127826,0 грн/рік.

Наведені розрахунки вартості вторинної сировини ґрунтуються на орієнтовних цінах, тому що, наприклад, кольорові метали можуть бути представлені різними видами – алюмінієм, міддю, бронзою – а їх ціни істотно різняться.

Теж саме відноситься до відходів пластикових матеріалів, зокрема, до категорії «інші види пластику» («OTHER»).

Без урахування ліквідності харчових та інших відходів, щороку з загального потоку ТПВ Одеської області можна отримати вторинну сировину на суму майже 1,4 млн. гривень. У разі створення ефективної системи поводження з харчовими та іншими органічними відходами цей показник може бути істотно збільшений.

Відокремлення і використання ресурсоцінних компонентів з загального потоку ТПВ буде сприяти зменшенню техногенного навантаження на природні складові довкілля і поліпшенню екологічної ситуації на території Одеської області.

4 ВИСНОВКИ

1. Значні зміни, що відбулися в нормативно-законодавчому полі сфери управління відходами, призвели до формування передумов створення нової концепції управління ТПВ. Попри значні зміни в термінології, в основних нормативно-законодавчих документах Україні немає терміну «тверді побутові відходи, а є термін «побутові відходи». Визначені основні неузгодженості термінологічного апарату сфери управління відходами, що мають місце у вітчизняній та міжнародній практиці. Зазначена різниця в термінах «тверді побутові відходи» та «тверді муніципальні відходи».

2. Попри прийняття основних вимог Директиви ЄС 2008/98/ЄС «Про відходи та скасування деяких директив» в положеннях Закону України «Про управління відходами», основним методом поводження з ТПВ лишається захоронення на полігонах і звалищах, які не відповідають сучасним європейським вимогам. Враховуючи економічну ситуацію в країні в умовах військового стану можна очікувати, що така тенденція зберігатиметься тривалий час.

3. Потреби ринку вторинної сировини визначають особливості роздільного збирання і сортування відходів. До основних ресурс оцінних компонентів слід віднести різні види пластику, папір і картон, метали, харчові відходи, скло.

4. Проаналізований сучасний стан системи управління та поводження з твердими побутовими відходами в Одеській області, а також дана оцінка ресурсної цінності твердих побутових відходів на території цієї області. Без урахування ліквідності харчових відходів, щороку з загального потоку ТПВ Одеської області можна отримати вторинну сировину на суму майже 1,4 млн. грн. У разі створення ефективної системи поводження з харчовими та іншими біоорганічними відходами цей показник може бути істотно збільшений. Одночасно з цим відбудеться зменшення техногенного навантаження на природні складові довкілля і поліпшення екологічної ситуації в Одеському регіоні.

5. Наголошено, що необхідною умовою створення ефективної системи управління ТПВ на регіональному рівні є організація відбору харчових відходів на початковій стадії життєвого циклу ТПВ.

Проведення подальших досліджень і ґрунтовних оцінок стану системи управління з ТПВ в окремих регіонах України, є перспективним напрямом досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. United Nations Environment Programme, Waste: Investing in Energy and Resource Efficiency - Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. URL: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/22012. (дата звернення: 1.11.2023).
2. Методичні рекомендації поводження з відходами. URL:https://drive.google.com/file/d/1xCVpu5i7K8FkaT6CG7dLhMbI9KUbKbFb/view?fbclid=IwAR1pqwmSHXv1NguNuCNXBOligdpzzabNWlzQ4w4fFI–hr1DiuyQfQUu3OE (дата звернення: 1.11.2023).
3. Державний класифікатор України. Класифікатор відходів ДК 005-96. URL: http://plast.vn.ua/DK005-96.html (дата звернення: 25.09.2023).
4. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/2320-20 (дата звернення: 29.09.2023).
5. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text (дата звернення: 25.09.2023).
6. United Nations Organization Glossary of Environment Statistics, Studies in Methods (1997). United Nations publication: New York, Series F. 1997. № 67. 96 p.
7. Гаркушенко О. Н. Правове забезпечення регулювання сфери поводження з твердими побутовими відходами в Україні. *Економіка та держава*. 2014. № 8. С. 37-41.
8. Сафранов Т. А., Шаніна Т. П., Приходько В. Ю. Класифікація твердих побутових відходів як передумова формування системи поводження з ними в регіонах України: монографія. Дніпро: Видавець Біла К.О., 2018. 100 с.
9. Garkushenko O. N. Regulation of the solid household wastes generation and treatment in Ukraine: guidelines and priorities. *Економіка промисловості*. 2014. №1. P. 107-117.
10. Шушляков О. В., Шушляков Д. О., Проскурня М. І. Утилізація відходів як фактор підвищення екологічної ефективності і безпеки життєдіяльності населення. *Світ довкілля*. 2011. № 19. С. 11–13.
11. Jensen J. K. Pesticide Waste Management Technology and Regulations. *ACS Symposium Series 510*. American Chemical Society, Washington, DC. Pp. 20–28.
12. Результати дослідження морфологічного складу твердих побутових відходів Львова. URL: https://zerowastelviv.org.ua/rezultaty-doslidzhennya-morfologichnogo-skladu-tverdyh-pobutovyh-vidhodiv-u-osbb-lvova/(дата звернення: 25.09.2023).
13. Семко П. П. Реалії співробітництва бізнесу та органів місцевого самоврядування в галузі поводження з ТПВ в Україні та напрями покращення ситуації. URL: http://greenchamber.org.ua/files/files/2019/TBO/BUSINESS%20REALITIES.pdf (дата звернення: 25.09.2023).
14. Тверді побутові відходи в Україні: потенціал розвитку. Сценарії розвитку сектора поводження з твердими побутовими відходами. URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/689821468337804553/pdf/Municipal-Solid-Waste-in-Ukraine-Development-Potential.pdf (дата звернення: 25.09.2023).
15. Практичні аспекти управління відходами в Україні: посібник/ Барінов М.О.,. Олексієвець І.Л., Родная Д.В. та ін. Київ : Поліграф плюс, 2021. 118 с.

REFERENCES

1. United Nations Environment Programme, *Waste: Investing in Energy and Resource Efficiency - Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*. (2011). Available at: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/22012. (Accessed: 1 November 2023).
2. *Metodychni rekomendatsii povodzhennia z vidkhodamy [Recommendation for waste management]*. Available at: https://drive.google.com/file/d/1xCVpu5i7K8FkaT6CG7dLhMbI9KUbKbFb/view?fbclid=IwAR1pqwmSHXv1NguNuCNXBOligdpzzabNWlzQ4w4fFI–hr1DiuyQfQUu3OE (Accessed: 1 November 2023). (in Ukr.).
3. *Derzhavnyi klasyfikator Ukrainy. Klasyfikator vidkhodiv DK 005-96. [State Classifier of Ukraine. Waste classifier DK 005-96. State Committee of Ukraine for Standardization, Metrology and Certification]*. Available at: http://plast.vn.ua/DK005-96.html (Accessed 25 September 2023) (in Ukr.).
4. *Zakon Ukrainy «Pro upravlinnya vidkhodamy» vid 20.06.2022 № 2320-IX*. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/2320-20 (Accessed 29 September 2023) (in Ukr.).
5. *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#Text (Accessed 29 September 2023) (in Ukr.).
6. United Nations Organization Glossary of Environment Statistics, Studies in Methods (1997). United Nations publication: New York, Series F, № 67.
7. Garkushenko, O.N. (2014). [Legal provision of regulation of the field of solid household waste management in Ukraine]. *Ekonomika ta derzhava [Economy and the state]*, 8, pp. 37-41. (in Ukr.)
8. Safranov,T.A., Shanina, T.P. & Prykhodko, V.Iu. (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 development of a waste management system in the regions of Ukraine]*. Dnipro: Bila K.O. (in Ukr.)
9. Garkushenko, O.N. (2014). Regulation of the solid household wastes generation and treatment in Ukraine: guidelines and priorities. *Ekonomika promyslovosti [Economy of industry]*,1, pp. 107-117.
10. Shushliakov, O.V., Shushliakov, D.O. & Proskurnia, M.I. (2011). [Waste disposal as a factor in increasing environmental efficiency and safety of life activities of the population]. *Svit dovkillia [The world of the environment]*, 19, pp. 11–13. (in Ukr.).
11. Jensen, J.K. Pesticide Waste Management Technology and Regulations. (1992). *ACS Symposium Series 510*. American Chemical Society, Washington, DC, pp. 20–28.
12. *Rezultaty doslidzhennia morfolohichnoho skladu tverdykh pobutovykh vidkhodiv Lvova [Results of the study of the morphological composition of solid household waste in Lviv]*. Available at: https://zerowastelviv.org.ua/rezultaty-doslidzhennya-morfologichnogo-skladu-tverdyh-pobutovyh-vidhodiv-u-osbb-lvova/ (Accessed 29 September 2023) (in Ukr.).
13. Semko, P.P. (2019). *Realii spivrobitnytstva biznesu ta orhaniv mistsevoho samovriaduvannia v haluzi povodzhennia z TPV v Ukraini ta napriamy pokrashchennia sytuatsii [The realities of cooperation between business and local self-government bodies in the field of solid household waste management in Ukraine and*

directions for improving the situation]. Available at: http://greenchamber.org.ua/files/files/2019/TBO/BUSINESS%20REALITIES.pdf (Accessed 29 September 2023) (in Ukr.).
14. *Tverdi pobutovi vidkhody v Ukraini: potentsial rozvytku. Stsenarii rozvytku sektora povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy [Solid household waste in Ukraine: development potential. Scenarios of the development of the solid household waste management sector*]. Available at: https://documents1.worldbank.org/curated/en/689821468337804553/pdf/Municipal-Solid-Waste-in-Ukraine-Development-Potential.pdf (Accessed 29 September 2023) (in Ukr.).
15. Barinov, M.O., Oleksiievets, I.L., Rodnaia, D.V. et al. (2021). *Praktychni aspekty upravlinnia vidkhodamy v Ukraini: posibnyk [Practical aspects of waste management in Ukraine: manual]*. Kyiv : Polihraf plius. (in Ukr.).

RESOURCE POTENTIAL OF MUNICIPAL SOLID WASTE IN ODESA REGION

T. A. Safranov, V. Yu. Prykhodko, D. Yu. Yanovsky

Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, safranov@ukr.net

Despite the widespread use of the term "municipal solid waste" (MSW), the main regulatory and legislative documents of Ukraine use the term "household waste". International practice also does not have a clear definition of the "municipal solid waste" concept, however, there are a number of related terms. Municipal solid waste is defined as a waste that is generated in the course of human activity, accumulated in residential buildings and social institutions and considered as unsuitable for further use at places of its generation. As for the related terms used in foreign and national practice, the term “household waste”, i.e. waste generated directly by households, is more appropriate. Municipal solid waste is a heterogeneous mixture that has a complex waste composition and its quantitative and qualitative characteristics are not constant and depend on characteristics of a certain country, region, city or town where it was generated, season and other factors. Growing volumes of municipal solid waste is one of the components of growing anthropogenic load that poses a threat to environmental safety of the country's regions and public health and negatively affects the state of our environment. The main methods of such solid waste management in Ukraine include landfilling, incineration, recycling and recovery. Out of the total annual waste volume generated on the post-Soviet territories, 93% are taken to landfills or dumpsites, 4% – incinerated, and only about 3% – recycled.

Therefore, creation and implementation of an effective system of solid waste management is an important task for ensuring environmental safety and sustainable development of the country's regions. Moreover, solid waste is a significant reserve for obtaining secondary material resources. According to the circular economy concept, almost all components of solid waste should be reused for production of new items. This will minimize negative impact on the environment and allow rational use of natural resources. The article analyses the current state of municipal solid waste management system in Odesa Region and assesses resource value of such waste. Secondary raw materials worth of almost UAH 1.4 million can be produced annually from the total flow of municipal solid waste in Odesa Region. And this figure does not take into account liquidity of food and other waste. After establishing an effective food and other organic waste management system, such amount may be significantly increased. Separation of resource-value components from the total solid waste flow and their subsequent use will help to reduce technogenic load on the environmental natural components and improve the overall environmental situation in Odesa Region.

Keywords: municipal solid waste; resource value components; separate collection; treatment; recycling.

Подання до редакції **: 08. 11. 2023**
Надходження остаточної версії **: 14. 11. 2023**
Публікація статті : **21. 12. 2023**

Видання зареєстровано в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Реєстраційне свідоцтво серія **КВ 23515-13355ПР** від 25.07.2018

The state registration of print media is **КВ 23515-13355ПР**, originating date is 25.07.2018

Рекомендовано до друку вченою радою Одеського державного екологічного університету, протокол № 10, 21. 12. 2023 р.

Recommendations from Science Council of Odessa State Environmental University, Protocol no.10, 21. 12. 2023

Адреса редакційної колегії:
65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15,
Одеський державний екологічний університет,
тел.: (0482)-35-73-71
redactor@odeku.edu.ua

Editorial board address:
65016, Odesa, 15 Lvivska st.
Odessa State Environmental University
tel.: (0482)- 35-73-71
redactor@odeku.edu.ua

Видавець і виготовлювач
Одеський державний екологічний університет
вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016
тел./факс: (0482) 32-67-35
E-mail: info@odeku.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 5242 від 08.11.2016

ISSN 2311-0902 (print). Український гідрометеорологічний журнал. 2023. № 32. 1 – 157.
ISSN 2616-7271 (online). Ukraïns′kij gìdrometeorologìčnij žurnal. 2023. № 32. 1 – 157.
Український гідрометеорологічний журнал
Ukrainian Hydrometeorological Journal