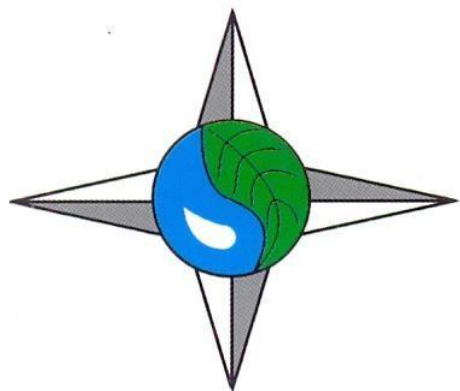


ISSN 2311-0902 (print)
ISSN 2616-7271 (online)



Номер 36

Issue 36

2026

УКРАЇНСЬКИЙ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Ukrainian Hydrometeorological Journal

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Ministry of Education and Science of Ukraine

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І. І. МЕЧНИКОВА

Odesa I. I. Mechnikov National University

**У К Р А Ї Н С Ь К И Й
ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ
ЖУРНАЛ**

Ukrains'kij Gidrometeorologičnij Žurnal

Ukrainian Hydrometeorological journal

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Scientific Journal

Друкується 2 рази на рік

Issued: 2 times a year

Заснований у 2005 р.

Founded in 2005 y.

№ 36, 2026

Одеса

ОНУ

2026

Засновник і видавець:
Одеський національний університет імені
І. І. Мечникова

Головний редактор
В. А. Овчарук, д-р геогр. наук, професор,
завідувачка кафедри гідрології суші
(Одеський національний університет імені
І. І. Мечникова)

Заступник головного редактора
А. В. Чугай, д-р техн. наук, професор,
завідувачка кафедри екології та охорони довкілля
(Одеський національний університет імені
І. І. Мечникова)

Члени редакційної колегії

Alexander Baklanov, доктор фізико-математичних наук, професор з метеорології і геофізики, старший науковець Данського метеорологічного інституту, запрошений професор Інституту Нільса Бора Копенгагенського університету (Данія); **М. А. Берлінський**, д-р геогр. наук, проф., завідувач кафедри океанології та морського природокористування ОНУ ім. І. І. Мечникова; **В. В. Гребінь**, д-р геогр. наук, проф., завідувач кафедри гідрології та гідроекології Київського національного університету ім. Тараса Шевченка; **Н. С. Лобода**, доктор географічних наук, професор, професор кафедри гідрології суші ОНУ ім. І. І. Мечникова; **Oleg Makarynskyu**, PhD в географії, пров. наук. співроб., Австралійський інститут морських наук, дослідницький центр "Арафура-Тимор" (Австралія); **О. В. Мудрак**, д-р с.-г. наук, проф., зав. кафедри екології, природничих та математичних наук ПХС "Вінницька академія безперервної освіти"; **А. М. Польовий**, д-р геогр. наук, проф., кафедри агрометеорології та агроекології ОНУ ім. І. І. Мечникова; **Т. А. Сафранов**, д-р геол.-мінер. наук, проф. кафедри екології та охорони довкілля ОНУ ім. І. І. Мечникова; **І. Г. Семенова**, д-р геогр. наук, доцент, дослідник Піренейського інституту екології Іспанської національної дослідницької ради (IPE-CSIC), Сарагоса, Іспанія; **Ivan Salamon**, професор, доктор (Dr.), MBA, професор, викладач Університету Пряшова, Словачья Республіка; **С. М. Степаненко**, д-р фіз.-мат. наук, проф., головний науковий співробітник відділу інтеграції науки, освіти та бізнесу Державної установи «Інститут ринку і економіко-екологічних досліджень НАН України»; **Ю. С. Тучковенко**, д-р геогр. наук, проф., провідний науковий співробітник відділу методології моніторингу та прогнозування Інституту морської біології НАН України **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 та кліматології ОНУ ім. І. І. Мечникова.

Редактор англomовних текстів

А. В. Іванченко, канд. філол. наук, доц. кафедри іноземних мов професійного спрямування ОНУ ім. І. І. Мечникова.

Відповідальний секретар

О. М. Соборова, канд. геогр. наук, доц. кафедри водних біоресурсів та аквакультури ОНУ ім. І. І. Мечникова

“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 Е4 «Науки про Землю» та Е2 «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’.

Founder and Publisher:
Odesa I. I. Mechnikov National University

Editor-in-Chief
Valeriya A. Ovcharuk, D. Sc. in Geography,
Prof., Head of the Department of Land Hydrology
(Odesa I. I. Mechnikov National University),
Ukraine

Deputy Editor-in-Chief
Angelina V. Chugai, D.Sc. in Technology,
Prof., Head of the Department of Ecology and Environmental Protection
(Odesa I. I. Mechnikov National University),
Ukraine

Members of the Editorial Board

Alexander 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. Berlinskiy**, D. Sc. in Geography, Prof., Head of the Department of Oceanography and Marine Nature Management of ONU, 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., Head 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 ONU, Ukraine; **Nataliya S. Loboda**, D. Sc. in Geography, Prof. of the Department of Land Hydrology ONU, Ukraine; **Oleg Makarynskyu**, PhD in Geography, Lead Researcher, Australian Institute of Marine Science, Arafura Timor Research Facility, 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; **Anatolii M. Polovyi**, D. Sc. in Geography, Prof. of the Department of Agrometeorology and Agroecology of ONU, Ukraine; **Tamerlan A. Safranov**, D. Sc. in Geology and Mineralogy, Prof. of the Department of Ecology and Environmental Protection of ONU; **Ivan Salamon**, Prof., Dr., MBA, Professor, University of Presov, Slovak Republic; **Inna Semenova**, D. Sc. in Geography, Assoc. Prof., Researcher at the Pyrenean Institute of Ecology, Spanish National Research Council (IPE-CSIC), Zaragoza, Spain; **Sergiy M. Stepanenko**, D. Sc. in Physics and Mathematics, Prof., Chief Research Scientist of the Department of Science, Education and Business Integration, State Institution “Institute of Market and Economic-Ecological Research of the National Academy of Sciences of Ukraine”; **Yu.S. Tuchkovenko**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Leading Research Scientist of the Department of Monitoring and Forecasting Methodology, Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine

Editor of texts in English

Andrii Ivanchenko, PhD in Philology, Assoc. Professor of the Department of Foreign Languages for Specific Purposes, Odesa I. I. Mechnikov National University

Executive Secretary

Olha. M. Soborova, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture, Odesa I. I. Mechnikov National University



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

ЗМІСТ

CONTENTS

Гідрологія суші, водні ресурси, гідрохімія

Hydrology and Water Resources, Hydrochemistry

Лобода Н. С., Розвод М. Р. Вплив Північноатлантичного коливання та Північноморсько-Каспійського коливання на кліматичні чинники формування стоку Дністра (Україна) на початку XXI століття

5 Loboda N. S., Rozvod M. R. The North Atlantic Oscillation and the North Sea–Caspian Oscillation influence on the climatic factors of the Dnister River runoff formation in the beginning of the XXI century (Ukraine)

Шакірманова Ж. Р., Блага А. О. Територіальна методика прогнозування меженних витрат води та оцінка настання маловоддя річок півдня України

17 Shakirzanova Zh. R., Blaha A. O. The territorial method of forecasting the low-flow discharge and assessment of streamflow deficit occasion of southern Ukraine rivers

Метеорологія і кліматологія

Meteorology and Climatology

Семергей-Чумаченко А. Б. Індeksi ETCCDI в Одеському регіоні за реаналізом ERA5-Land та даними метеостанції: тренди та верифікація за 1991–2020 рр.

34 Semerhei-Chumachenko A. B. ETCCDI indices in the Odessa region based on ERA5-Land reanalysis and station observations: trends and validation for 1991–2020

Океанологія

Oceanography

Малюга Е. Є., Гаврилюк Р. В. Залежність максимального розповсюдження криги в протоці Дейвіса і морі лабрадор з атмосферним тиском і швидкістю приземного вітру в північній частині атлантичного океану та північному льодовитому океані

54 Maliuha E. E., Gavriliuk R. V. Dependence of maximum ice extent in the Davis strait and the Labrador sea with atmospheric pressure and surface wind speed in the North Atlantic and the Arctic Oceans

Агрометеорологія

Agricultural Meteorology

Нікітін П. С., Ільїна В. Г. Оцінка балансу біогенних елементів південних районів України з урахуванням сучасних умов вирощування ярого ячменю

67 Nikitin P. S., Ilina V. G. Assessment of the balance of biogenic elements in the southern regions of Ukraine under current conditions of spring barley cultivation

Куклишин О. В., Вольвач О. В. Агрокліматична оцінка ризику весняних заморозків для плодovих культур на Закарпатті в умовах сучасної зміни клімату

80 Kuklyshyn O. V., Volvach O. V. Agroclimatic risk assessment of spring frosts for fruit crops in the Transcarpathian region under modern climate change

**Екологічні аспекти
природокористування**

**Environmental Aspects of
Nature Management**

- Тучковенко Ю. С., Мартинюк М. О., Богатова Ю. І., Гаркуша О. П., Бушуєв С. Г., Калашнік К. С. Зміни показників гідроecологічного стану Тилігульського лиману після реконструкції з'єднуючого з морем каналу **89**
- Дьяченко М. Ю., Сафранов Т. А. Монетизація окремих екосистемних послуг (корисних властивостей) природних систем північно-західного шельфу Чорного моря **109**
- Волошин В. С., Бурко В. А. Системний підхід до класифікації промислових відходів: принципи мінімізації відходоутворення на етапах життєвого циклу матеріалів **116**
- Пасенко А. В., Солошич І. О. Інноваційна харчова біотехнологія отримання функціонального напою з бактерицидним ефектом за умов оптимізації використання ресурсу мінеральних вод **124**
- Внукова Н. В., Слобожанюк В. С. Інтеграція технологій Mass Timber у стратегії Net Zero та післявоєнного відновлення міської інфраструктури України (на прикладі м. Харкова) **133**
- Грабко Н. В. Сезонна складова ризику смертності населення України від хвороб системи кровообігу **139**
- Пасенко А. В., Солошич І. О., Новохатько О. В. Інноваційне технологічне рішення регуляції режиму аерації в технології очищення стічних вод за умов оптимізації функціонування мікробіоценозу активного мулу в біоспорудах **148**
- Tuchkovenko Yu. S., Martyniuk M. O., Bogatova Yu. I., Garkusha O. P., Bushuiev S. G., Kalashnik K. S. Changes in the hydroecological status indicators of the Tylihul estuary after the reconstruction of the sea-connecting channel
- Dyachenko M. Yu., Safranov T. A. Monetization of certain ecosystem services (benefits) of natural systems of the northwestern Black Sea shelf
- Voloshyn V. S., Burko V. A. Systemic approach to the classification of industrial waste: principles of waste minimization at the stages of the material life cycle
- Pasenko A. V., Soloshych I. O. Innovative food biotechnology for producing a functional beverage with bactericidal effect under conditions of optimized use of mineral water resources
- Vnukova N. V., Slobozhaniuk V. S. Integration of Mass Timber technologies into Net Zero strategies and post-war reconstruction of urban infrastructure in Ukraine (case study of Kharkiv)
- Hrabko N. V. Seasonal component of the mortality risk among the population of Ukraine from diseases of the circulatory system
- Pasenko A. V., Soloshych I. O., Novohatko O. V. Innovative technological approach to aeration regime control in technology for wastewater treatment through optimization of the activated sludge microbiocenosis in biological treatment systems

ВПЛИВ ПІВНІЧНОАТЛАНТИЧНОГО КОЛИВАННЯ ТА ПІВНІЧНОМОРСЬКО-КАСПІЙСЬКОГО КОЛИВАННЯ НА КЛІМАТИЧНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ СТОКУ ДНІСТРА (УКРАЇНА) НА ПОЧАТКУ ХХІ СТОРІЧЧЯ

Н. С. Лобода, М. Р. Розвод

*Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
вул. Всеволода Змієнка, 2, 65000, Одеса, Україна
natalie.loboda@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>*

Актуальність обраної теми обумовлена впливом змін клімату на формування водності річок України, серед яких значуще місце посідає річка Дністер. Дністер забезпечує водою південно-західну частину України і республіку Молдова. Зміни клімату обумовлюють, насамперед, вплив кліматичних чинників (опадів та температур повітря) на формування стоку. Метою роботи є виявлення ролі атмосферних процесів – Північно-Атлантичного коливання (ПАК) або North Atlantic Oscillation (NAO) та Північноморсько-Каспійського коливання (ПКК) або North Sea Caspian Pattern (NCP) на кліматичні чинники формування стоку Дністра. Головним методом дослідження є метод регресійного аналізу. Для виявлення циклічності у коливаннях індексів застосований метод ковзного осереднення. У роботі використані гідрологічні та метеорологічні дані з 1948 року, для сумісного аналізу рядів – з 1955 по 2021 рр. Оскільки у наявних базах даних індекси NCP наведені лише до 2005 року, авторами був продовжений ряд індексів до 2021 року згідно із методикою Kutiel H., Benaroch Y. (2002). Для розрахунку індексу NCP за період 2006–2021 рр. використано дані реаналізу ERA5 щодо геопотенціалу на ізобаричній поверхні 500 гПа (Z500) у центрах дії Північного моря (55°N, 5°E) та Північного Каспію (45°N, 55°E). Опрацьовано дані тринадцяти метеорологічних станцій (Мостиська, Яворів, Львів, Стрий, Дрогобич, Турка, Славське, Коломия, Івано-Франківськ, Кам'янець-Подільський, Тернопіль, Любашівка, Роздільна). Виявлено, що середні багаторічні температури повітря по всіх метеорологічних станціях характеризуються статистично значущим кореляційним зв'язком із зимовими індексами NAO. Це свідчить про вплив Північно-Атлантичного коливання на формування температурного режиму повітря на водозборі Дністра на всій його протяжності з північного заходу на південний схід (у межах України). Зв'язків індексів NAO із характеристиками опадів не встановлено. Роль NCP у формуванні річного стоку Дністра є менш значущою. Установлений тісний зворотній зв'язок між річними сумами опадів та індексами NCP для верхньої частини Дністра (Мостиська, Яворів, Львів, Івано-Франківськ, Стрий, Дрогобич). Для інших метеорологічних станцій таких зв'язків не виявлено. Показано, що у негативну фазу коливань NCP зростають як опади, так і стік річок Стрв'яж, Верещиця, Щерек. Ця обставина обумовлює особливості коливань стоку указаних річок на відміну від інших приток Дністра. Встановлені закономірності дозволять точніше оцінювати перспективи змін стоку приток Дністра під впливом глобальних атмосферних процесів.

Ключові слова: Північно-Атлантичне Коливання (ПАК або NAO); Північноморсько-Каспійське коливання (ПКК або NCP); кліматичні чинники формування стоку, температури повітря; опади; річний стік

1. ВСТУП

Актуальність обраної теми визначається необхідністю постійного моніторингу гідрометеорологічних характеристик в умовах глобального потепління. У Водній стратегії України до 2050 року (розпорядження від 9 грудня 2022 р. № 1134-р, Київ) [1] зазначається, що завданнями з досягнення цілі 4 (Скорочення зростаючих ризиків нестачі води та надлишку води) є “стимулювання

дослідження щодо змін кількісних характеристик водних ресурсів України внаслідок зміни клімату; розроблення та включення до планів управління річковими басейнами заходів з адаптації до зміни клімату з урахуванням середньо- та довгострокових сценаріїв зміни клімату”.

Водозбір річки Дністер має значну протяжність з північного заходу на південний схід України і проходить через декілька географічних зон. Дністер є транскордонною річкою, яка постачає

воду у 7 областей України та республіку Молдова.

Водозбір Дністра знаходиться у Північній Атлантико-континентальній кліматичній та Південній Атлантико-кліматичній областях [2].

Зона формування стоку знаходиться у верхній частині водозбору і припадає на правобережні гірські притоки (область підвищеної водності) та лівобережжя Дністра, яке знаходиться в гідрологічній області достатньої водності, провінції широколистяних мішаних лісів [3].

Широколиста волога ландшафтно-гідрологічна зона [4] відрізняється від інших територій Дністра проявом деяких особливостей у характері коливань стоку. Наприклад, у роботі Овчарук В.А. та Мартинюка М.О. [5] на початку ХХІ століття установлені зміни у характері коливань максимальних витрат та шарів стоку у період весняного водопілля та формування позитивної фази коливань дощових паводків в басейні річки Західний Буг, який межує із басейном Дністра у його верхній частині. У роботі Горбачової Л.О. та Христюка Б.Ф. розглядувана зона виділена в окремий Західно-Бузький район за кривими Ендрюса [6], куди входять як притоки Західного Бугу, так і лівобережні притоки Верхнього Дністра. Авторами цієї статті [7] установлене, що на цих притоках коливання ординат різницевого інтегральних кривих річного стоку та максимального стоку весняного водопілля і дощових паводків відбуваються майже синхронно із формуванням позитивної (багатоводної) фази, що виділяє їх серед інших приток Дністра.

Зміна фаз водності річок визначається глобальними атмосферними процесами [8], які в першу чергу впливають на кліматичні чинники формування стоку - опади та температуру повітря, як головний показник теплоенергетичних ресурсів клімату [9].

Оскільки атмосферні процеси визначають особливості коливань кліматичних чинників та стоку річок, то досліджуючи їх можна установити причини мінливості стоку Дністра.

Метою роботи є виявлення ролі атмосферних процесів – Північно-Атлантичного коливання (ПАК або NAO) та Північноморсько-Каспійського коливання (ПКК або NCP) на кліматичні чинники формування стоку Дністра.

Огляд літератури. Регіональні зміни температури, що відбуваються, частково співвідносяться з різними фазами атмосферно-океанічних коливань, таких як Північно-Атлантичне – Арктичне коливання [10].

Квазісинхронні низькочастотні коливання тиску в Азорському максимумі та в Ісландському

мінімумі називають Північно-Атлантичним Коливанням (ПАК) або North Atlantic Oscillation (NAO) [11]. Це гігантська система, яка визначає «західне перенесення» вологи на всю Європу. Проте, як указано в [12], для Східного Середземномор'я та Східної Європи NAO часто пояснює лише 10–15% мінливості опадів.

NAO описує загальне західне перенесення вологи з Атлантики і визначає силу зональної (захід–схід) циркуляції, оскільки контролює інтенсивність західних вітрів та перенесення повітряних мас над Атлантикою [9]. Однак, на території України атлантичні повітряні маси часто стикаються з континентальними або трансформуються [10].

Важливим індикатором кліматичної мінливості Північної півкулі виступає Північноморсько-Каспійське коливання [11]. «Оскільки територія України розташована досить близько до одного з полюсів цього атмосферного циркуляційного сигналу, то даний тип мінливості представляє особливий інтерес, і багато в чому визначає величину аномалій температури, особливо на півдні країни і над акваторією Чорного і Азовського морів» [12].

У свою чергу, Північноморсько-Каспійське коливання або North Sea Caspian Pattern (NCP) є диполним телезв'язком між районом Північного моря та Каспійського регіону, що формує просторову структуру типу «північний захід – південний схід» з позитивними аномаліями у північно-західній Європі та негативними — у південно-східних регіонах. Атмосферний процес NCP є диполем, який описує меридіональні потоки повітря в Європі [13; 14].

Раніше вважалося, що NCP впливає лише на Балкани, Туреччину та Ізраїль. У роботі [14] доводиться, що вплив Північноморсько-Каспійського коливання поширюється на значну частину Європи. Доведено, що в певних регіонах NCP пояснює варіативність клімату краще, ніж NAO (Північно-Атлантичне коливання) або EA (Східно-Атлантичне коливання).

Хоча основи вивчення NCP були закладені Kutiel H., Benaroch Y. (2002) [11] на початку 21 століття, сучасні дослідження [15] підтверджують, що цей індекс залишається важливим для розуміння кліматичної мінливості не лише Середземномор'я, а й усієї Євро-Середземноморської зони, включаючи територію України. Басейн Дністра знаходиться в зоні трансформації повітряних мас [16], де атлантичний вплив (NAO) при переході на схід слабшає, а вплив «баричного жолоба» (NCP) між Північним морем та Каспієм

стає визначальним для опадів [13]. Згідно із даними роботи [17] індекси NCP в позитивній фазі можуть суттєво посилювати посушливість клімату Європи. У [15] зазначається, що NCP корисний для зображення не лише температури, але й аномалій опадів у центральній, західній, та північно-західній частинах Європи.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У роботі використані дані метеорологічних спостережень на діючих метеорологічних постах, які розташовані на водозборі р. Дністер або поряд у межах України (Мостиська, Яворів, Львів, Стрий, Дрогобич, Турка, Славське, Коломия, Івано-Франківськ, Кам'янець-Подільський, Тернопіль, Любашівка, Роздільна). Оскільки на багатьох метеорологічних та гідрологічних станціях басейну Дністра початок спостережень припадає на 50 – ті роки минулого сторіччя, ряди формувалися за єдиним періодом спостережень: 1955–2021 рр. Максимальна тривалість спостережень становить 71 рік (1951–2021 рр.).

Кількісні показники атмосферних процесів представляються у виді атмосферних індексів, телеконнекційних індексів та патернів. Телеконнекційні індекси широко використовуються для прогнозування гідрометеорологічних режимів річок України [18; 19; 20]. Північно-Атлантичне коливання є термобаричною схемою, яка відображає наявність коливань аномалій тиску в атмосфері Північної Атлантики. Дію атмосферних процесів можна оцінити за допомогою індексів, які зазвичай розраховуються як різниця між характеристиками тиску у певних точках. Наприклад, індекс ПАК можна оцінити як різницю між зниженим тиском Ісландії (Ісландський мінімум) і підвищеним тиском Азорських островів (Азорський максимум). Коливання аномалій тиску викликають зміни у коливаннях клімату на Європейському континенті. Позитивні значення індексів Північно-Атлантичного коливання зв'язують із підвищенням температур повітря та опадів в Північній Європі та зменшенням температури та кількості опадів у Південній Європі. Та навпаки, негативні індекси ПАК супроводжуються більш сухим кліматом в Північній Європі, та більш теплим й вологим кліматом у Південній Європі.

У роботі використовувався часовий ряд середніх місячних значень індексу NAO, запропонованому центром прогнозування клімату NOAA Climate Prediction Center (CPC) [21]. Дата 1950 року обрана не випадково: вона вважається початком ери «надійних даних», коли мережа метео-

рологічних спостережень та аерологічного зондування стала достатньо щільною для точного моделювання глобальної атмосфери. Індекс NAO від NOAA базується на методі ротації головних компонент (RPCA) [22].

На відміну від станційного методу (де просто порівнюють тиск у двох точках), NOAA використовує аналіз полів висоти геопотенціалу 500 гПа над усією Північною півкулею. Це дозволяє виділити NAO як домінуючу форму мінливості, що не залежить від дрібних помилок окремих метеостанцій [24]. Станційний метод (Station-based indices) – це класичний метод, який базується на різниці нормалізованих аномалій тиску між двома конкретними метеорологічними станціями: однією в зоні Азорського максимуму, іншою — в зоні Ісландського мінімуму [23].

Кількісною мірою інтенсивності Північноморсько-Каспійського коливання або North Sea-Caspian Pattern виступає спеціальний кліматичний індекс NCP, визначений через середньобаторічні значення геопотенціальної висоти ізобаричної поверхні 500 гПа між Північним морем та Каспійським морем [11].

Більшість класичних робіт [25; 13; 11] обмежуються даними до початку 2000-х років, оскільки індекси NCP, які були розраховані відділом кліматичних досліджень Університету Східної Англії закінчуються у 2005 році (1948–2005 рр.).

Для самостійного розрахунку та подовження рядів, у даній роботі використовувалися нормалізовані значення геопотенціалу Z500 у двох полюсах: N1 (Північне море): 55°N, 5°E та N2 (Північний Каспій): 45°N, 55°E [11]. Залучені дані отримані з проекту реаналізу ERA5, які доступні для завантаження на сітці 0,25 × 0,25 км і охоплюють весь період від 1950 року до сьогодення [26; 27].

Для розрахунку значень, починаючи з 2006 року, була використана формула, яка наведена в стандартних таблицях [11]:

$$NCPI = \frac{Z500N1 - \overline{Z500N1}}{\sigma(Z500N1)} - \frac{Z500N2 - \overline{Z500N2}}{\sigma(Z500N2)}, \quad (1)$$

де Z500N1 – нормалізовані значення геопотенціалу у полюсі N1 (Північне море)

$\overline{Z500N1}$ – середнє багаторічне значення геопотенціалу у полюсі N1 (Північне море)

Z500N2 – нормалізовані значення геопотенціалу у полюсі N2 (Каспійське море)

$\overline{Z500N2}$ – середнє багаторічне значення геопотенціалу у полюсі N2 (Каспійське море)

$\sigma(Z500N1)$ – кліматологічне стандартне відхилення у полюсі N1 (Північне море)

$\sigma(Z500N2)$ – кліматологічне стандартне відхилення у полюсі N2 (Каспійське море)

Для кожного місяця було розраховано середнє значення та середньоквадратичне відхилення σ на основі масиву даних за 2006–2021 рр. Далі були обчислені нормовані аномалії для кожного полюса та виведено підсумковий індекс як різницю. Це нівелює сезонний хід (різницю між літом і зимою).

З метою оцінки впливу атмосферних процесів на кліматичні чинники формування стоку був застосований регресійний аналіз [28] для пошуку зв'язків між кліматичними характеристиками та індексами розглядуваних атмосферних процесів. Також був застосований метод згладжування хронологічних рядів індексів NAO та NCP для виявлення фази їх коливань. Зазвичай п'ятирічне згладжування використовується для виявлення короткострокових квазіперіодичних коливань (цикли 3–5 років, характерні для опадів). Одинадцятирічне згладжування дозволяє нівелювати випадкові шуми та побачити багаторічні тренди, які можливо пов'язані з сонячною активністю або глобальними кліматичними змінами.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Аналізуючи згладжені по 11-річках коливання середнього річного індексу ПАК (NAO), можна зробити висновок, що перехід у позитивну фазу їх коливань відбувся у 1980/1981 році (максимум значень індексів спостерігався у 1989 році). Початок від'ємної фази припадає на 2004 рік з мінімумом у 2010 році (рис.1). У багатьох дослідженнях впливу ПАК (NAO) на гідрометеорологічні процеси використовується зимовий індекс (грудень, січень, лютий), оскільки в цей період градієнт тиску між центрами дії атмосфери є максимальним. У зимового індексу NAO позитивна фаза коливань починається з 1989 і триває до 2021 року із формуванням від'ємного “сплеску” у період 2005-2014 рр. (рис.2). Пошук зв'язків між кліматичними чинниками та індексами NAO дозволив виявити статистично значущі залежності середніх річних температур повітря від зимових індексів NAO (табл.1), (рис.3). Слід зазначити, що на водозборі річки Дністер (Україна) для усіх метеостанцій у коливаннях різницевого інтегральних кривих середніх річних температур повітря

була виділена позитивна фаза коливань, яка розпочалася з 1989 року [29, 30]. Це дозволяє зробити висновок про вплив глобального коливання ПАК на формування температурного режиму в басейні Дністра. Статистично значущих кореляційних зв'язків індексів ПАК із характеристиками опадів (річні, сезонні, місячні суми опадів) у даному дослідженні не було виявлено.

Аналіз згладженого по 11-річках хронологічного ряду індексів Північноморського-Каспійського коливання (NCP) показав, що позитивне коливання тривало з 1998 року по 2005, після чого почалася від'ємна фаза (рис.4). Виявлено існування тісного зв'язку між річними індексами NCP та річними сумами опадів на таких метеостанціях верхньої течії Дністра: Мостиська, Яворів, Львів, Стрий, Івано-Франківськ, Дрогобич, що свідчить про вплив меридіанального (Північне море-Каспій) переносу повітряних мас на розподіл опадів верхньої рівнинної течії Дністра. Значення коефіцієнтів кореляції знаходяться у межах $r \approx -0,33$ до $-0,55$ (табл. 2). У той же час на інших метеорологічних станціях водозбору Дністра зв'язку опадів із індексами Північноморського-Каспійського коливання (NCP) не виявлено. Значення коефіцієнтів кореляції знаходяться у межах $r \approx -0,08$ до $-0,26$ (табл. 2). З рисунка 5 видно, що при від'ємних значеннях індексу NCP кількість опадів у лівобережній частині верхів'я Дністра зростає, а при позитивних - зменшується. Можливо, саме за рахунок впливу Північноморського-Каспійського коливання пояснюються зміни у характері коливань стоку приток верхнього Дністра та їх приналежність до правобережного або лівобережного районів із синхронними коливаннями стоку у різні інтервали часу [31].

Якщо розглядати різницево інтегральні криві річних опадів верхньої течії Дністра, то можна побачити, що саме у цій частині басейну з середини 90-х сформувалася додатна фаза коливань опадів (рис.6). І це знайшло своє відображення у коливаннях річного стоку (рис.7). У свою чергу, характер різницевого інтегральних кривих опадів та стоку у інших частинах басейну Дністра характеризується наявністю від'ємних фаз коливань, що суттєво відрізняє їх від коливань верхньої течії (рис. 8, 9). Таким чином, індекс ППК (NCP) відіграє важливу, але не визначальну роль у формуванні режиму зволоження басейну Дністра, впливаючи передусім на рівнинну частину верхньої течії.

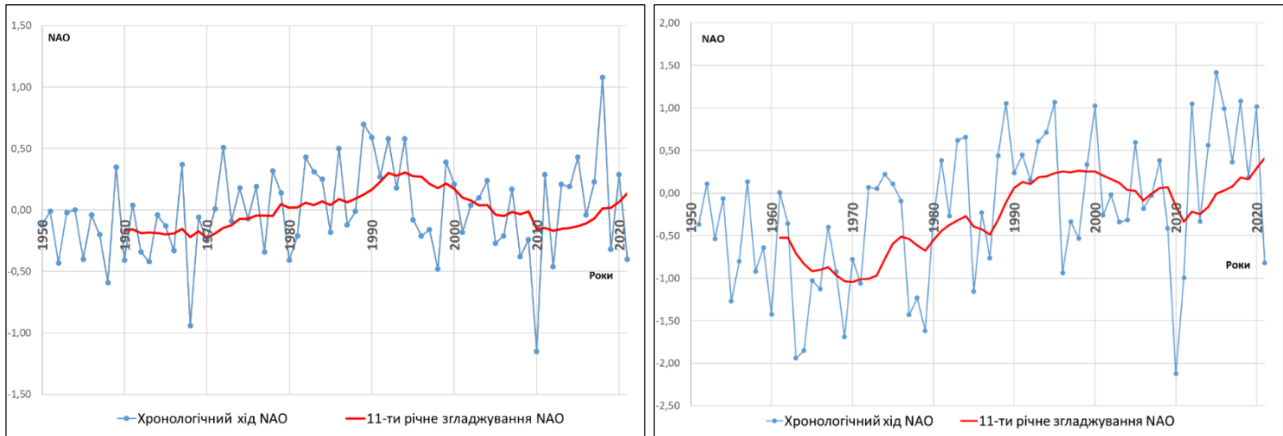


Рис. 1 – Графік хронологічного ходу індексу NAO (1950–2021 pp.) та згладжена крива індексу NAO (зліва)

Fig. 1 – Graph showing the chronological trend of the NAO index (1950–2021) and NAO index moving average (left)

Рис. 2 – Графік хронологічного ходу зимового індексу NAO (1950–2021 pp.) та згладжена крива зимового індексу NAO (справа)

Fig. 2 – Graph showing the chronological trend of the winter NAO index (1950–2021) and NAO winter index moving average (right)

Таблиця 1 – Рівняння регресії та висновки щодо значущості трендів залежності середніх річних температур повітря від зимових індексів NAO на метеостанціях в межах басейну р. Дністер (Україна)

Table 1 – Regression equations and conclusions regarding the significance of trends in the relationship between mean annual air temperatures and winter NAO indices at weather stations within the Dniester River basin (Ukraine)

Метеостанція	Вид рівняння регресії (y – середня річна температура повітря, x – зимовий індекс NAO)	Коефіцієнт детермінації, R^2	Коефіцієнт кореляції, r	Висновок щодо значущості
Івано-Франківськ	$y = 0,6647x + 7,7527$	0,37	0,61	Значущий
Мостиська	$y = 0,7567x + 8,2608$	0,36	0,60	Значущий
Яворів	$y = 0,7854x + 7,9796$	0,34	0,58	Значущий
Львів	$y = 0,7252x + 7,5967$	0,33	0,57	Значущий
Стрий	$y = 0,6307x + 8,1455$	0,33	0,57	Значущий
Дрогобич	$y = 0,6308x + 7,987$	0,27	0,52	Значущий
Славське	$y = 0,593x + 5,9077$	0,25	0,50	Значущий
Турка	$y = 0,5426x + 6,3271$	0,24	0,49	Значущий
Коломия	$y = 0,9365x + 8,0089$	0,39	0,62	Значущий
Кам'янець-Подільський	$y = 0,665x + 8,2691$	0,26	0,51	Значущий
Тернопіль	$y = 0,777x + 7,2369$	0,33	0,57	Значущий
Любашівка	$y = 0,6847x + 8,8365$	0,27	0,52	Значущий
Роздільна	$y = 0,6419x + 9,8591$	0,24	0,49	Значущий

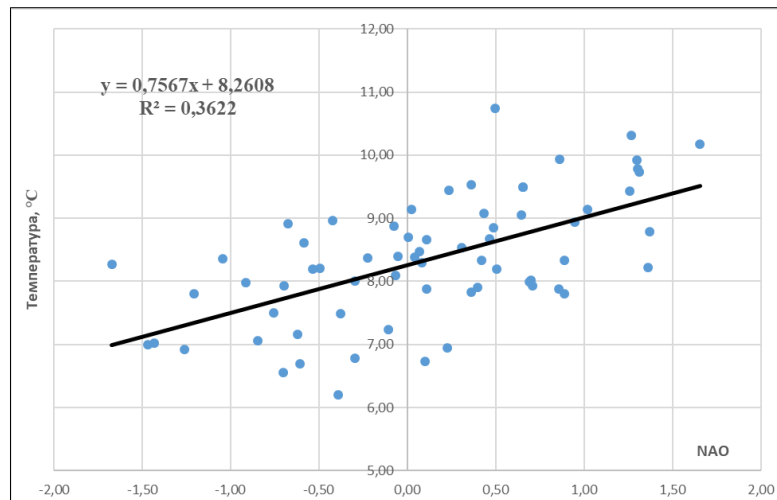


Рис.3 – Залежність середніх річних температур повітря від зимових індексів NAO на метеостанції Мостиська (1955-2021 рр.)
Fig. 3 – Correlation between average annual air temperatures and winter NAO indices at the Mostyska weather station (1955–2021)

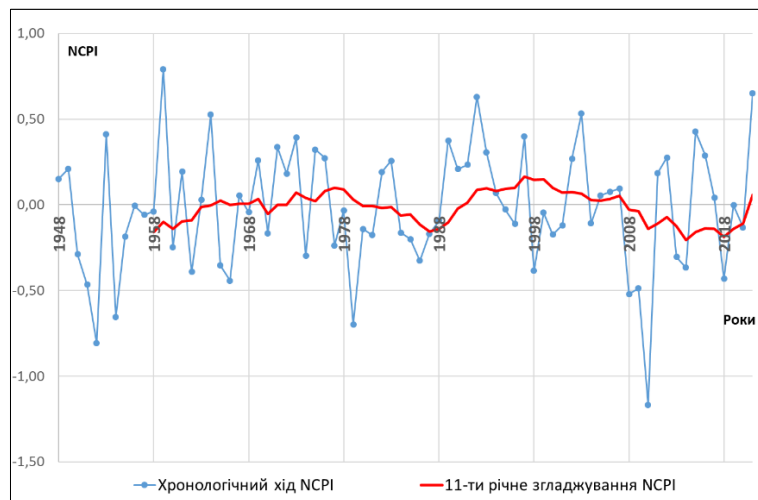


Рис. 4 – Графік хронологічного ходу індексу NCP (1948-2021 рр.) та згладжений ряд індексу NCP
Fig. 4 – Graph showing the chronological trend of the NCP index (1948–2021) and NCP index moving average

Таблиця 2 – Статистичні параметри зв'язку між індексом NCP та річними сумами опадів (1955–2021 рр.)
Table 2 – Statistical parameters of the relationship between the NCP index and annual precipitation totals (1955–2021)

Метеостанція	Коефіцієнт детермінації, R^2	Коефіцієнт кореляції, r	Висновок щодо значущості
Верхня течія Дністра, лівобережжя			
Мостиська	0,30	-0,55	Значущий
Яворів	0,23	-0,48	Значущий
Львів	0,15	-0,39	Значущий
Передкарпатський кліматичний район, правобережжя			
Стрий	0,16	-0,40	Значущий
Дрогобич	0,13	-0,36	Значущий

Кінець таблиці 2

Івано-Франківськ	0,11	-0,33	Значущий
Гірськокарпатський кліматичний район, правобережжя			
Славське	0,01	-0,10	Незначущий
Турка	0,07	-0,27	Незначущий
Поділля, лівобережжя			
Кам'янець-Подільський	0,006	-0,08	Незначущий
Тернопіль	0,006	-0,08	Незначущий
Степова зона, лівобережжя			
Любашівка	0,07	-0,26	Незначущий

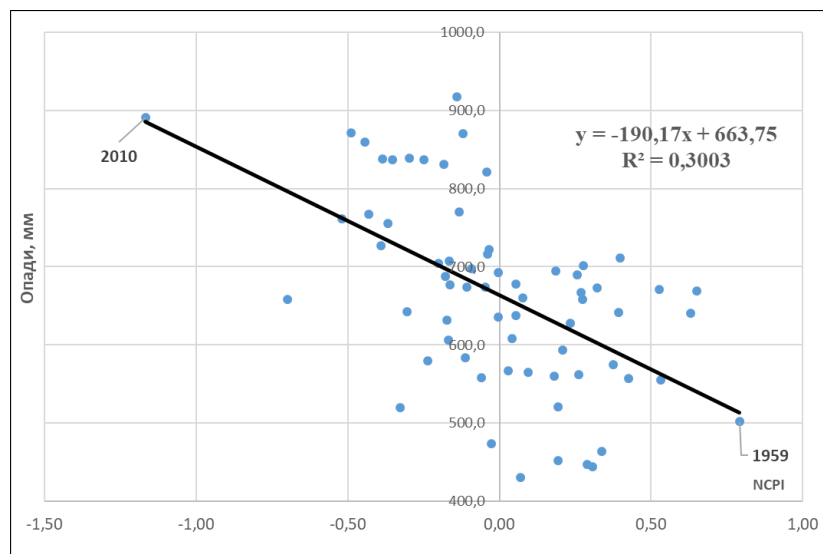


Рис. 5 – Графік зв'язку індексу NCP та річної кількості опадів на метеостанції Мостиська з лінією тренду (період 1955-2021 рр., $r=0,55$)

Fig. 5 – Correlation between NCP index and annual precipitation at the Mostyska weather station with a trend line (1955–2021, $r = 0,55$)

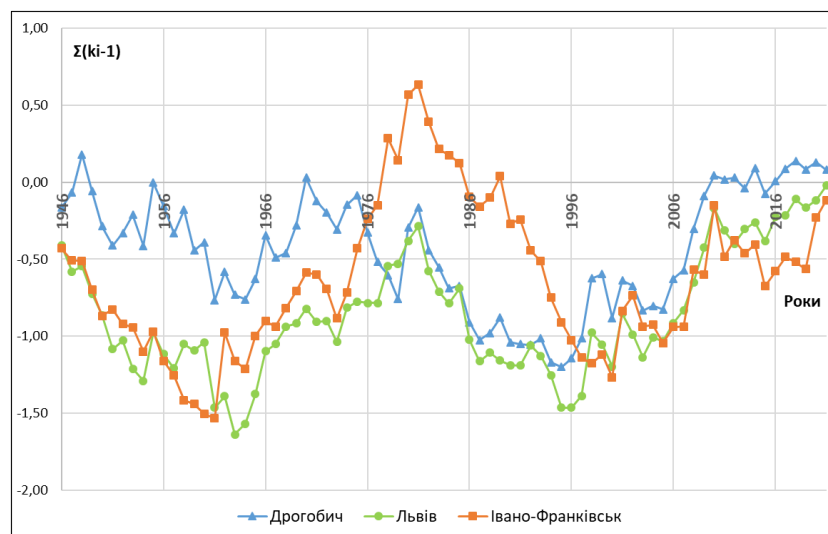


Рис. 6 – Різницеви інтегральні криві річної кількості опадів на метеостанціях верхньої течії Дністра (1946-2021 рр.)

Fig. 6 – Residual mass curves of annual precipitation at weather stations in the upper reaches of the Dniester (1946–2021)

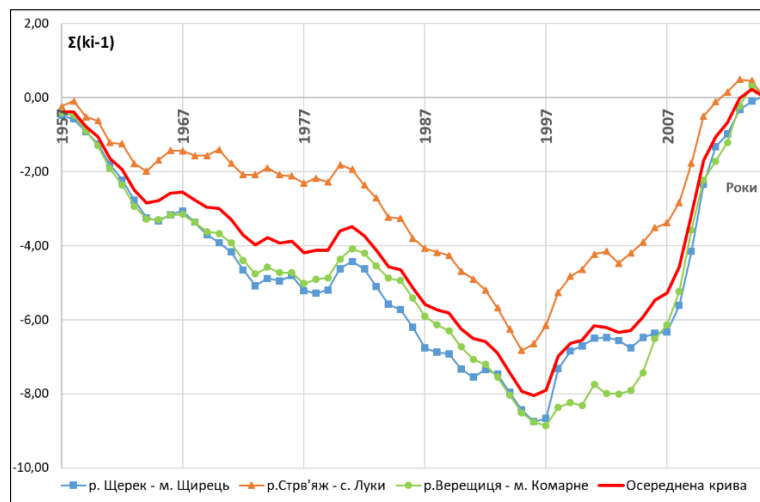


Рис. 7 – Різницеви інтегральні криві річного стоку лівобережних приток у верхній течії Дністра та осереднена інтегральна крива

Fig. 7 – Residual mass curves of the annual runoff of the left-bank tributaries in the upper reaches of the Dniester and the averaged residual mass curve

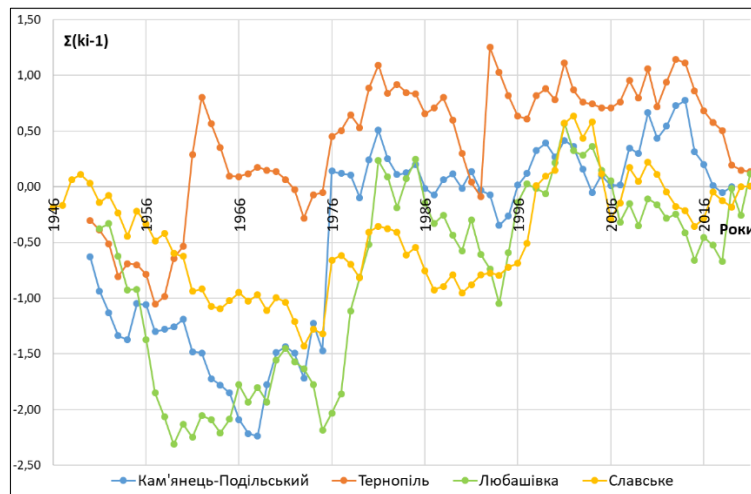


Рис. 8. - Різницеви інтегральні криві річної кількості опадів на метеостанціях басейну Дністра (1946-2021 рр.)

Fig. 8 - Residual mass curves of annual precipitation at weather stations of the Dniester river basin (1946–2021)

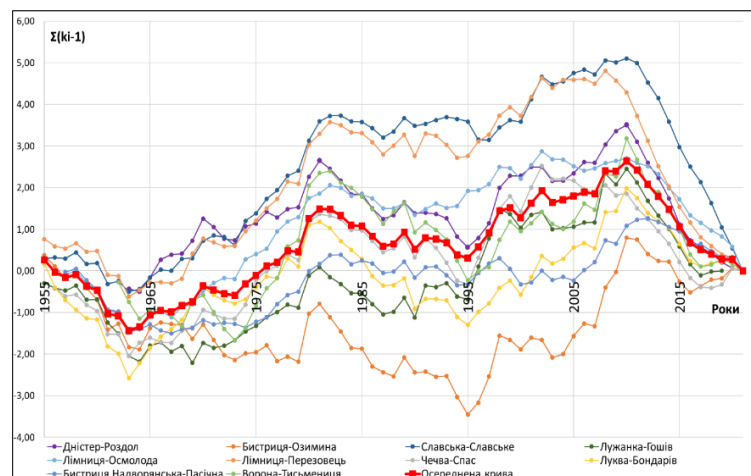


Рис. 9 – Різницеви інтегральні криві річного стоку правобережних приток у гірській частині Дністра та осереднена інтегральна крива

Fig. 9 – Residual mass curves of the annual runoff of the right-bank tributaries in the mountainous area of Dniester and the averaged residual mass curve

4. ВИСНОВКИ

1. Установлено, що в басейні річки Дністер вплив Північно-Атлантичного Колювання (ПАК) на кліматичні чинники проявляється у формуванні температурного режиму повітря, що підтверджується виявленими тісними кореляційними зв'язками між зимовими індексами ПАК та середніми річними температурами повітря у межах усього басейну. Стійких зв'язків індексів ПАК із характеристиками опадів не виявлено.

2. З метою подовження рядів значень індексів ПКК (NCP) виконано розрахунок значень цього індексу за період 2006-2021 рр. на основі методики Kutiel H., Benaroch Y. (2002). Індекс ПКК (NCP) відображає інтенсивність атмосферних процесів, які формуються у результаті баричних колювань між Північною Європою та Каспієм.

3. Отримано, що зимові індекси ПАК з 2011 по 2020 рік знаходилися у позитивній фазі колювань, а індекси ПКК – у від'ємній. Така ситуація забезпечує переважання західного переносу над водозбором Дністра.

4. На основі пошуку зв'язків між індексами Північноморсько-Каспійського колювання та характеристиками температур повітря впливу ПКК на температурний режим повітря у межах водозбору Дністра не виявлено. Статистично значущі зворотні зв'язки між індексами ПКК і річними сумами опадів отримані лише для верхньої течії Дністра (лівобережні притоки), що обумовило наявність позитивної фази колювань стоку у цій частині басейну на відміну від інших приток Дністра та головної річки.

5. Виявлено, що із зростанням зимового індексу ПАК зростає середня річна температура повітря; із зростанням річного індексу ПКК зменшується кількість річних опадів.

6. Установлення ролі ПКК (NCP) у формуванні стоку та взаємодії цього меридіонального атмосферного процесу із західним переносом ПАК (NAO) в басейні Дністра потребує подальшого дослідження, особливо в межах гірської зони.

7. Індекс ПКК (NCP) відіграє важливу, але не визначальну роль у формуванні режиму зволоження басейну Дністра, впливаючи передусім на рівнинну частину верхньої течії. Основним великомасштабним атмосферним процесом, який означає синхронність колювань стоку є Північно-Атлантичне Колювання.

8. Практичне значення. Отримані результати відповідають стратегічним цілям «Водної стратегії України до 2050 року» та можуть бути інтегровано

вані в плани управління річковим басейном Дністра. Встановлені закономірності дозволяють точніше оцінювати ризики нестачі або надлишку води в умовах кліматичних змін.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Водна стратегія України на період до 2050 року (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 9 грудня 2022 р. № 1134-р) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-D1%80#Text> (дата звернення 27.03.2026)
2. Кліматичне районування України. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/zoning-12.html#w1n1> (дата звернення 25.03.2026).
3. Гідрологічне районування України URL: <https://geomap.land.kiev.ua/zoning-7.html> (дата звернення 25.03.2026).
4. Гребін В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ Ніка-центр. 2010. С. 316.
5. Мартинюк М. О., Овчарук В. А. Просторова і часова мінливість максимального стоку в басейні Вісли в умовах кліматичних змін. *Екологічні науки*. Київ. 2023. № 3(48) С. 148-155. <https://doi.org/10.32846/23069716/2023.eco.3-48.24>
6. Горбачева Л. О., Христюк Б. Ф. Гідрологічне районування території України за умовами формування стоку води на основі кривих Ендрюса. *Український географічний журнал*. 2016. № 3. С. 27-33.
7. Гончарова Л. Д., Серга Е. М., Школьнік Є. П. Клімат і загальна циркуляція атмосфери. Київ. 2005. С. 251.
8. Лобода Н.С., Коробчинська А.О. Оцінка впливу мінливості Північно-Атлантичного та Скандинавського колювань на гідрометеорологічні характеристики України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2010. С. 91-98.
9. Лобода Н.С. Методические подходы к оценке естественных водных ресурсов горных районов на основе метеорологической информации (на примере горной части бассейна р.Днестр). *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. Одеса. 2002. № 45. С. 118 – 124.
10. Decadal trends in the North Atlantis Oscillation: Regional temperature and precipitation / Hurrell J. W. *Science*. 1995. Vol. 269. Pp. 676-679.
11. North Sea-Caspian (NCP) – an upper level atmospheric teleconnection affecting the Eastern Mediterranean: Identification and definition / Kutiel H., Benaroch Y. *Theor. Appl. Climatol.* 2002. Vol. 71. Pp. 17-28.
12. Гончарова Л. Д., Прокоф'єв О. М., Решетченко С. І., Черниченко А. В. Вплив атмосферних макропроцесів на просторовий розподіл опадів по території України у весняний сезон. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2021. № 27. С. 5-15. <https://doi.org/10.31481/uhmj.27.2021.01>.
13. North Sea Caspian Pattern (NCP) – an upper level atmospheric teleconnection affecting the eastern Mediterranean: Implications on the regional climate / Kutiel H., Maheras P., Türkes M., Paz S. *Theoretical and Applied Climatology*. 2002. Vol. 72, 173-192. <https://doi.org/10.1007/s00704-002-0674-8>.
14. The relevance of the North-Sea Caspian Pattern (NCP) in explaining temperature variability in Europe and the Mediterranean / Brunetti M., Kutiel H.: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011. Vol 11, Pp. 2881–2888,

- <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2881-2011>.
15. The merit of the North Sea-Caspian pattern in explaining climate variability in the Euro-Mediterranean region / Çaglar F., Yetemen O., Chun K. P., Sen O. L. *International Journal of Climatology*. 2023. Vol. 43 (10), Pp. 4648–4661. <https://doi.org/10.1002/joc.8108>.
 16. План управління річковим басейном Дністра 2025-2030. URL: https://davr.gov.ua/fls18/tu/RBMP_Dniester/purb_dnis.pdf (дата звернення 22.03.2026)
 17. Impact of the North Sea–Caspian pattern on meteorological drought and vegetation response over diverging environmental systems in western Eurasia / He, Q. et al. *Ecohydrology*. 2022. Vol. 15. <https://doi.org/10.1002/eco.2446>
 18. Серга Е. М., І. М. Серга. Відгуки аномалій характеристик клімату України у зимовий період на процеси взаємодії в системі «атмосфера-океан» в Північній Атлантиці. Монографія. 2021.
 19. Хохлов В. Н. Вплив Північноатлантичного коливання на енергетику позатропічних широт. *Метеорологія, кліматологія та гідрологія: Міжвід. науковий збірник України*. Одеса. 2002. Вип. 46. С. 30-34.
 20. Христюк Б., Горбачова Л. Методики довгострокового прогнозування строків довготривалого льодоставу та очищення від льоду водосховищ Дніпровського каскаду за телеконнекційними показниками. *Геофізичний журнал*. 2023. Вип. 45 (6). С. 87-101.
 21. Часовий ряд місячних значень індексу NAO центру прогнозування клімату NOAA Climate Prediction Center (CPC) URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/norm.nao.monthly.b5001.current.ascii.table> (дата звернення 01.04.2026)
 22. Rotation of principal components. / Richman M. B., *Journal of Climatology*, 1986. Vol. 6. Pp. 293-335. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060305>.
 23. Structure and evolution of the North Atlantic Oscillation identified through station-based and EOF-based indices / Benedict, J. J., et al. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2004. Vol. 61(2). Pp. 121-144.
 24. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland / Jones P. D et al. *International Journal of Climatology*. 1997. Vol. 17(13). Pp. 1433-1450, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19971115\)17:13%3C1433::AID-JOC203%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13%3C1433::AID-JOC203%3E3.0.CO;2-P)
 25. New evidences for the role of the North Sea – Caspian Pattern on the temperature and precipitation regimes in continental central Turkey / Kutiel H., Türke M. *Geogr. Ann.* 2005. Vol. 87. Pp. 501–513. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2005.00274.x>
 26. The ERA5 global reanalysis: preliminary extension to 1950 / Bell B., Hersbach H., Simmons A., Berrisford P., Dahlgren P., Horanyi A. et al. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2021. Vol. 147. Pp. 4186–4227. <https://doi.org/10.1002/qj.4174>.
 27. The ERA5 global reanalysis / Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horanyi A., Muñoz-Sabater J. et al. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146 (730), Pp. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
 28. Школьнік С. П., Лосєва І. Д., Гончарова Л. Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації. Київ. *Міносвіти України*. 1999. С. 600.
 29. Лобода Н. С., Розвод М. Р. Зміни температурного режиму повітря в басейні річки Дністер на початку XXI сторіччя. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2024. Вип. 33. С. 38-48. <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.03>
 30. Лобода Н. С., Розвод М. Р. Закономірності коливаний стоку річки Дністер (Україна) в умовах кліматичних змін на початку XXI сторіччя. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. Вип. 32. С. 50-62. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.04>
 31. Мельник С.В., Лобода Н.С. Динамика наносов верхнього і середнього Дністра в умовах антропогенної навантаження і змін клімату. Монографія. 2019. С. 294

REFERENCES

1. Order № 1134-p of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 23 December 2022 On Approval of the Water Strategy of Ukraine until 2050 // Verkhovna Rada of Ukraine. 12.09.2022. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (Accessed: 27.03.2026) (in Ukr.)
2. Climatic zoning of Ukraine. Available at: <https://geomap.land.kiev.ua/zoning-12.html#w1n1> (Accessed: 25.03.2026) (in Ukr.)
3. Hydrological zoning of Ukraine. Available at: <https://geomap.land.kiev.ua/zoning-7.html> (Accessed 25 March 2026) (in Ukr.)
4. Hrebin, V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrainy (landshaftno-hidrolohiichnyi analiz) [Modern water regime of Ukrainian rivers (landscape and hydrological analysis)]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. Pp. 316. (in Ukr.)
5. Martyniuk, M. O., Ovcharuk, V. A. (2023). *Prostorova i chasova minlyvist maksimalnoho stoku v baseini Visly v umovakh klimatichnykh zmin [Spatial and temporal variability of maximum runoff in the Vistula basin under climate change conditions]*. *Ekolohichni nauky [Environmental Sciences]*. Vol. 3(48). Pp. 148-155. <https://doi.org/10.32846/23069716/2023.eco.3-48.24> (in Ukr.)
6. Horbachova, L. O., Khrystiuk, B. F. (2016). *Hidrolohiichne raionuvannya terytorii Ukrainy za umovamy formuvannya stoku vody na osnovi kryvykh Endriusa [Hydrological zoning of the territory of Ukraine by the conditions of water runoff formation based on Andrews curves]*. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*. Vol. 3. Pp. 27-33. (in Ukr.)
7. Honcharova, L. D., Serha, E. M., Shkolnyi, Ye. P. (2005). *Klimat i zahalna tsirkulatsiia atmosfery [Climate and general circulation of the atmosphere]*. Kyiv. Pp. 251. (in Ukr.)
8. Loboda N. S., Korobchinska A. O. (2010). *Otsinka vplyvu minlyvosti Pivnichno-Atlantynohoho ta Skandinavskoho kolyvan na hidrometeorolohichni kharakterystyky Ukrainy [Assessment of the Impact of Variability in North Atlantic and Scandinavian Oscillations on the Hydrometeorological Characteristics of Ukraine]*. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia [Hydrology, Hydrochemistry, and Hydroecology]*. Pp. 91–98.
9. Loboda N. S. (2002). *Metodycheskye podkhody k otsenke estestvennykh vodnykh resursov hornykh raionov na osnove meteorolohicheskoi informatsiy (na prymere hornoi chasty basseina r.Dnestr) [Methodological Approaches to Assessing Natural Water Resources in Mountainous Areas Based on*

- Meteorological Data (Using the Mountainous Part of the Dniester River Basin as an Example)*. Meteorologhiia, klimatologhiia ta hidrologhiia [Meteorology, climatology, and hydrology] Vol. 45. Pp. 118 – 124. (in Ukr.)
10. Hurrell, J. W. (1995). Decadal trends in the North Atlantis Oscillation: Regional temperature and precipitation. *Science*, 269. pp. 676-679.
11. Kutiel, H., Benaroch, Y. (2002). North Sea-Caspian (NCP) – an upper level atmospheric teleconnection affecting the Eastern Mediterranean: Identification and definition. *Theoretical and Applied Climatology*, 71. pp. 17-28. <https://doi.org/10.1007/s704-002-8205-x>
12. Honcharova L. D., Prokofiev O. M., Reshetchenko S. I., Chernychenko A. V. (2021). *Vplyv atmosfernykh makroprosesiv na prostorovi rozpodil opadiv po terytorii Ukrainy u vesnianyi sezon* [Influence of atmospheric macroprocesses on the spatial distribution of precipitation in Ukraine during the spring season]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal* [Ukrainian Hydrometeorological Journal], 27. pp. 5–15. <https://doi.org/10.31481/uhmj.27.2021.01> (in Ukr.)
13. Kutiel, H., Maheras, P., Türkes, M., Paz, S. (2002). North Sea Caspian Pattern (NCP) - an upper level atmospheric teleconnection affecting the eastern Mediterranean: Implications on the regional climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 72. pp. 173-192. <https://doi.org/10.1007/s00704-002-0674-8>.
14. Brunetti, M. and Kutiel, H. (2011). The relevance of the North-Sea Caspian Pattern (NCP) in explaining temperature variability in Europe and the Mediterranean. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11. pp. 2881–2888, <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2881-2011>.
15. Çaglar, F., Yetemen, O., Chun, K. P., & Sen, O. L. (2023). The merit of the North Sea-Caspian pattern in explaining climate variability in the Euro-Mediterranean region. *International Journal of Climatology*, 43(10). pp. 4648–4661. <https://doi.org/10.1002/joc.8108>.
16. *Dniester River Basin Management Plan 2025-2030*. // Verkhovna Rada of Ukraine. Available at: https://dav.gov.ua/fls18/tu/RBMP_Dniester/purb_dnis.pdf (Accessed: 22.03.2026) (in Ukr.)
17. He, Q. et al. (2022). Impact of the North Sea–Caspian pattern on meteorological drought and vegetation response over diverging environmental systems in western Eurasia / *Ecohydrology*. Vol. 15. <https://doi.org/10.1002/eco.2446>
18. Serha, E. M., Serha, I. M. (2021). *Vidhuky anomalii kharakterystyk klimatu Ukrainy u zymovyi period na protsesy vzaiemodii v systemi «atmosfera-ocean» v Pivnichnii Atlantysi* [Responses of climate characteristic anomalies of Ukraine in the winter period to interaction processes in the "atmosphere-ocean" system in the North Atlantic]. Monograph. (in Ukr.)
19. Khokhlov, V. N. (2002). *Vplyv Pivnichnoatlantynohoho kolyvannia na enerhetyku pozatropichnykh shyrot* [Influence of the North Atlantic Oscillation on the energetics of extratropical latitudes]. *Meteorologhiia, klimatologhiia ta hidrologhiia* [Meteorology, Climatology and Hydrology]. Vol. 46. Pp. 30-34. (in Ukr.)
20. Khrystiuk, B. F., Horbachova, L. O. (2023). *Metodyky dovhostrokovoho prohnozuvannia strokiv dovhotryvaloho liodostavu ta ochyshchennia vid liodu vodoshkovysh Dniprovskoho kaskadu za telekonneksiinymy pokaznykamy* [Methods of long-term forecasting of long-term ice cover dates and ice clearing of the Dnieper cascade reservoirs by teleconnection indicators]. *Heofizychnyi zhurnal* [Geophysical Journal]. Vol. 45(6). Pp. 87-101. (in Ukr.)
21. Monthly Mean NAO index of the NOAA Climate Prediction Center (CPC). Available at: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/norm.nao.monthly.b5001.current.ascii.table> (Accessed: 01.04.2026).
22. Richman, M. B. (1986). Rotation of principal components. *Journal of Climatology*. Vol. 6. Pp. 293-335. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060305>
23. Benedict, J. J., et al. (2004). Structure and evolution of the North Atlantic Oscillation identified through station-based and EOF-based indices. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Vol. 61(2). Pp. 121-144.
24. Jones, P. D., et al. (1997). Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *International Journal of Climatology*. Vol. 17(13). Pp. 1433-1450. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19971115\)17:13%3C1433::AID-JOC203%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13%3C1433::AID-JOC203%3E3.0.CO;2-P)
25. Kutiel, H., Türkes, M., (2005). New Evidence for the role of the North Sea – Caspian Pattern on the temperature and precipitation regimes in continental central Turkey. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 87:4. Pp. 501–513. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2005.00274.x>
26. Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horanyi, A. et al. (2021). The ERA5 global reanalysis: preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147. Pp. 4186–4227. <https://doi.org/10.1002/qj.4174>
27. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Muñoz-Sabater, J. et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730). Pp. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
28. Shkolnyi, Ye. P., Loieva, I. D., Honcharova, L. D. (1999). *Obrobka ta analiz hidrometeorologichnoi informatsii* [Processing and analysis of hydrometeorological information]. Kyiv: Minosvity Ukrainy. Pp. 600. (in Ukr.)
29. Loboda, N. S., Rozvod, M. R. (2024). Changes in the air temperature regime in the Dniester River basin at the beginning of the 21st century. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal* [Ukrainian Hydrometeorological Journal]. Vol. 33. Pp. 38-48. <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.03> (in Ukr.)
30. Loboda, N. S., Rozvod, M. R. (2023). Patterns of Dniester River runoff fluctuations (Ukraine) under climate change conditions at the beginning of the 21st century. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal* [Ukrainian Hydrometeorological Journal]. Vol. 32. Pp. 50- 62. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.04> (in Ukr.)
31. Melnyk S. V., Loboda N. S. *Dynamika nanosov verhnego I srednego Dnestra v usloviyah antropogennoy nagruzki I izmeneniy klimata* [Sediment dynamics in the upper and middle Dniester under the influence of human activity and climate change]. Monography. 2019. C. 294

THE NORTH ATLANTIC OSCILLATION AND THE NORTH SEA–CASPIAN OSCILLATION INFLUENCE ON THE CLIMATIC FACTORS OF THE DNISTER RIVER RUNOFF FORMATION IN THE BEGINNING OF THE XXI CENTURY (UKRAINE)

N.S. Loboda, M.R. Rozvod

*Odesa I.I. Mechnikov National University,
2 Vsevolod Zmienko Street, Odessa, 65000, Ukraine,
natalie.loboda@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>*

The relevance of the chosen topic stems from the impact of climate change on the water runoff of Ukraine's rivers, among which the Dniester River plays a significant role. The Dniester supplies water to the south-western part of Ukraine and the Republic of Moldova. Climate change is primarily driven by the influence of climatic factors (precipitation and air temperature) on runoff formation. The aim of this study is to identify the role of atmospheric processes – the North Atlantic Oscillation (NAO) and the North Sea Caspian Pattern (NCP) – on the climatic factors influencing the Dniester's runoff. The main research method is regression analysis. The moving average method was applied to identify cyclicity in the fluctuations of the indices. The study utilises hydrological and meteorological data from 1948, and for the joint analysis of time series – from 1955 to 2021. Since the available databases contain NCP indices only up to 2005, the authors extended the index series to 2021 in accordance with the methodology of Kutiel H., Benaroch Y. (2002). To calculate the NCP index for the period 2006–2021, ERA5 reanalysis data on geopotential at the 500 hPa isobaric surface (Z500) were used at the centres of the North Sea (55°N, 5°E) and the North Caspian Sea (45°N, 55°E). Data from thirteen meteorological stations (Mostyska, Yavoriv, Lviv, Stryi, Drohobych, Turka, Slavske, Kolomyia, Ivano-Frankivsk, Kamianets-Podilskyi, Ternopil, Liubashivka, Rozdilna) were analysed. It was found that the long-term average air temperatures at all meteorological stations are characterised by a statistically significant correlation with winter NAO indices. This indicates the influence of the North Atlantic Oscillation on the formation of the air temperature regime in the Dniester catchment along its entire length from the north-west to the south-east (within Ukraine). No links between NAO indices and precipitation characteristics have been established. The role of the NCP in shaping the Dniester's annual runoff is less significant. A close inverse relationship has been established between annual precipitation totals and NCP indices for the upper reaches of the Dniester (Mostyska, Yavoriv, Lviv, Ivano-Frankivsk, Stryi, Drohobych). No such correlations were found for other meteorological stations. It has been shown that during the negative phase of NCP fluctuations, both precipitation and the flow of the Strv'yazh, Vereshchytsia and Shcherok rivers increase. This circumstance accounts for the distinctive characteristics of flow fluctuations in these rivers, in contrast to other tributaries of the Dniester. The established patterns will allow for a more accurate assessment of the prospects for changes in the flow of the Dniester's tributaries under the influence of global atmospheric processes.

Keywords: North Atlantic Oscillation (NAO); North Sea-Caspian Oscillation (NCP); climatic factors influencing runoff formation; air temperature; precipitation; annual runoff

*Подання до редакції : 26. 01. 2026
Надходження остаточної версії : 27. 03. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026*

УДК 556.16.06:556.535.4/.5(477)

ТЕРИТОРІАЛЬНА МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ МЕЖЕННИХ ВИТРАТ ВОДИ ТА ОЦІНКА НАСТАННЯ МАЛОВОДДЯ РІЧОК ПІВДНЯ УКРАЇНИ

Ж.Р. Шакірманова, А.О. Блага

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
вул. Всеволода Змієнка, 2, 65000, Одеса, Україна
jannetodessa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5657>

У статті досліджено особливості формування меженного стоку річок Півдня України в умовах сучасних кліматичних змін, розглянуто територіальну методику короткострокового прогнозування меженних витрат води річок та обґрунтовано підходи до просторової оцінки маловоддя та ймовірності її настання у сучасний період водності річок території. Актуальність роботи зумовлена посиленням дефіциту водних ресурсів, збільшенням частоти гідрологічних посух і необхідністю оперативного прогнозування маловоддя для забезпечення ефективного управління водними ресурсами регіону.

Метою роботи є удосконалення територіальної методики прогнозування середньодажних витрат води у періоди літньо–осінньої та зимової межні (при подовженні рядів гідрологічних спостережень, уточненні сезонних територіальних залежностей та розширенні часових меж літнього гідрологічного сезону), а також розробка підходів до просторової оцінки маловоддя та ймовірності його настання на річках Півдня України.

Встановлено, що в умовах сучасних кліматичних змін на території Півдня України спостерігається тенденція до зменшення меженного стоку річок, що пов'язано зі зростанням температури повітря та зміною режиму атмосферних опадів. Це спричиняє посилення дефіциту водних ресурсів і підвищення ризику розвитку гідрологічного маловоддя.

У дослідженні використано багаторічні ряди спостережень за витратами води на річках басейнів Південного Бугу, Нижнього Дніпра та річок Північно–Західного Причорномор'я – за період 1980–2020 рр. при удосконаленні прогнозної методики та в період до 2025 р. – для перевірки методики на незалежних даних. Застосований метод прогнозу, заснований на розрахунку характеристик виснаження стоку води в період межні у вигляді регіональних залежностей між початковими та прогнозними модулями стоку, виконані статистична оцінка методики прогнозу і картографічний аналіз просторового розподілу прогнозних характеристик. Для оцінки ймовірності настання маловоддя побудовано емпіричні криві забезпеченості меженних витрат води.

Встановлено, що територіальна методика забезпечує задовільну якість короткострокових прогнозів середньодажних витрат води з критерієм якості $S/\sigma = 0,71–0,82$ та забезпеченістю допустимої похибки 74–87%. Виявлено продовження маловодної фази стоку в сучасний кліматичний період, особливо для річок Північно–Західного Причорномор'я, де в окремі сезони спостерігається пересихання малих водотоків. Просторовий аналіз прогнозних модулів стоку та їх забезпеченості дозволив визначити райони найбільшого ризику розвитку гідрологічної посухи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх застосування у діяльності гідрометеорологічних і водогосподарських організацій, при плануванні водокористування, оцінці екологічного стану річкових басейнів та розробленні адаптаційних заходів до змін клімату.

Ключові слова: меженні витрати води, зміна клімату, водозабезпечення, дефіцит води, прогнозування, територіальна методика, оцінка настання маловоддя, критерії маловоддя, ймовірність маловоддя.

1. ВСТУП

Формування гідрологічного режиму річкових систем визначається складною взаємодією кліматичних умов, геологічної

будови території та фізико–географічних характеристик водозбору. У структурі водного режиму особливе значення має меженний період, під час якого стік формується переважно за

рахунок підземного живлення і характеризується мінімальними витратами води.

Унаслідок потепління клімату зменшення атмосферних опадів у поєднанні з підвищенням температури повітря спричиняє зростання випаровування та зниження ефективного зволоження території. Це обмежує процеси інфільтрації і, відповідно, поповнення підземних вод, що безпосередньо впливає на величину базисного стоку. За таких умов меженний стік виступає інтегральним індикатором стану водних ресурсів і дозволяє оцінити ступінь розвитку гідрологічної посухи.

Інформація про низький рівень стоку необхідна для широкого кола застосувань, які часто контролюються національним та міжнародним водним законодавством та політикою. Так, Водна Рамкова Директива 2000/60/ЄС [1] встановила стратегічну основу для сталого інтегрованого управління в межах річкових басейнів як поверхневими водними, так і підземними водними ресурсами. З метою розробки довгострокових планів розвитку річкових басейнів необхідними є й оцінки низького рівня стоку для послаблення негативного впливу штучних водозаборів на навколишнє середовище та планування й управління майбутнім розвитком водних ресурсів.

У Водному кодексі України [2] також простежується цілісний підхід, за яким інтегроване управління водними ресурсами в межах річкових басейнів безпосередньо пов'язане з урахуванням природної мінливості стоку, зокрема обмеженості та вразливості водних ресурсів у періоди маловоддя, та спрямоване на мінімізацію їх негативного впливу на економіку і довкілля. При цьому сучасне критичне зниження водності річок обумовлює необхідність регулювання режимів роботи водогосподарських систем і водосховищ з урахуванням прогнозу водності та інтересів усіх водокористувачів.

На період до 2050 року у Водній стратегії України [3] інтегроване управління водними ресурсами в межах річкових басейнів безпосередньо пов'язується з проблемою зниження водності річок і дефіциту води, які розглядаються як ключові фактори ризику для сталого розвитку економіки, що потребують системного, науково обґрунтованого та комплексного управлінського реагування.

На фоні тенденції до зниження середнього річного стоку більшості річок, обміління водних об'єктів і майже пересихання малих річок, що

зумовлено як змінами клімату, так і антропогенними чинниками, зокрема нераціональним водокористуванням, значна частина території України, особливо південні райони, вже належить до регіонів з низьким рівнем водозабезпечення, що посилює проблему дефіциту води [3].

Однією з цілей Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) є підтримка комплексного управління басейном річки за необхідності забезпечення послідовного та належного аналізу даних про навколишнє середовище, базового моніторингу та аналізу гідрологічного стоку річок, зокрема оцінювання low-flow характеристик [4]. При цьому згідно термінології Міжнародного глосарію з гідрології ЮНЕСКО та ВМО [5] та документу «Гідрологічна посуха – процеси та методи оцінки стоку та ґрунтових вод» [6] в виданнях ВМО [4,7] здійснюється аналіз формування низьководного режиму річки, оцінка та прогнозування низького стоку чи низьких витрат води в різних часових масштабах. Низький стік і пов'язані з ним маловоддя та посухи розглядаються як один із ключових ризиків для економіки та довкілля. Попередження про низькі витрати води забезпечують основу для прийняття рішень щодо розвитку водних ресурсів у масштабах усього водозбору та сприяють прийняттю спеціальних рішень у кожному окремому випадку.

Відповідно Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя, діючого в Україні [8] «Маловоддя або гідрологічна посуха – це період у гідрологічному режимі водних об'єктів з малими і дуже малими витратами води, формування та утримання яких має небезпечний вплив на сектори економіки, об'єкти господарювання, життєдіяльність населення та навколишнє природне середовище».

Так, посушливий регіон Півдня України перебуває у зоні підвищеного ризику, зумовленого дефіцитом водних ресурсів і формуванням екстремально низького стоку в меженний період. У зв'язку з цим особливого значення набувають визначення та прогнозування меженного стоку для оцінювання можливих ризиків маловоддя для водного господарства та водозалежних галузей економіки держави.

З метою завчасної оперативної оцінки водності річок у періоди гідрологічної межени на кафедрі гідрології суші Одеського національного університету імені І.І.Мечникова на основі розробленого методу територіальних короткострокових прогнозів середніх декадних

витрат води річок Півдня України здійснюється поточне прогнозування цих витрат води [9, 10], що дозволяє оцінювати ступінь маловоддя (гідрологічну посуху) річок протягом меженного періоду, а також надавати ймовірність його настання у багаторічному періоді.

Метою даного дослідження є удосконалення територіальної методики прогнозування середньодадних витрат води в період літньо-осінньої та зимової межени для завчасної оцінки маловоддя та ймовірності його настання на річках Півдня України.

Результати, викладені у статті, підготовлено в рамках науково-дослідної роботи кафедри гідрології ОНУ імені І.І. Мечникова: «Гідрологічний і гідрохімічний режими річок України в сучасних умовах водокористування і зміни клімату» (номер держреєстрації: 0123U101578).

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Головною метою прогнозування маловоддя є оцінка стоку води річок у поєднанні з майбутніми потребами у водокористуванні, враховуючи набір ознак стану басейну та кліматичних умов у заданий момент часу [4]. Математичне моделювання є ключовим інструментом дослідження та прогнозування гідрологічних процесів. Серед найбільш поширених підходів виділяють такі групи моделей як емпіричні, концептуальні та фізично обґрунтовані (розподілені) моделі, а також статистичні [4, 7].

Так, *емпіричні моделі* базуються на статистичних зв'язках між опадами та стоком води. Вони є простими у реалізації, однак мають обмежену прогностичну здатність у змінних кліматичних умовах. Такі методи прогнозування стоку річок широко використовувалися в вітчизняній практиці (в [9]).

Регресійний аналіз на основі емпіричних даних є більш гнучким інструментом, який можна використовувати для прогнозування низького стоку води [4]. Методи, засновані на регресійному аналізі річкових потоків, тобто на процесах виснаження запасів води у водозбірному басейні за відсутності дощу, забезпечують достовірний прогноз короткострокових умов потоку. Включення в прогнозну методику кількості опадів періоду перед складанням прогнозу або за період його завчасності дозволяє детальніше врахувати подальші зміни витрат води в річці.

Широкого використання в практиці прогнозування меженного стоку річок набули *концептуальні моделі*, такі як HBV або SAC–

SMA. Вони описують процеси формування стоку через резервуарні схеми та базуються на спрощеному представленні процесів водного балансу і дозволяють моделювати взаємозв'язок між опадами, випаровуванням та стоком води [11–13].

Фізично обґрунтовані (розподілені) моделі базуються на рівняннях руху води в пористих середовищах і русловій мережі. Зокрема, моделі SWAT, MIKE SHE або SHE, забезпечують детальне відтворення процесів формування стоку на основі фізичних законів. Вони враховують просторову структуру басейну та дозволяють моделювати вплив різних факторів, однак потребують значного обсягу вхідних даних і складної калібровки.

Так, модель SWAT була використана авторами [14] для визначення поширення посухи та оцінки ризику в басейні річки Наолі (на північному сході Китаю) на основі моделювання гідрологічних процесів та оцінки кількісного впливу змін клімату та землекористування на стік.

В роботі [15] високороздільну SWAT– модель застосовано для моделювання гідрологічної динаміки та динаміки поживних речовин у низовині річки Адідже (на північному сході Італії), остання має зворотній зв'язок з посушливими періодами водності річки.

Застосування розподіленої гідрологічної моделі SWAT виконано й в інших роботах авторів [16, 17] для оцінки гідрологічної посухи.

Розвитком розподілених моделей стала розробка просторово-часової моделі SWIM для прогнозування водного стоку. Зокрема, авторами [18] здійснено адаптацію гідрологічної моделі SWIM для прогнозування стоку води із добовим ходом, із завчасністю 3...7 днів рівнинних річок Казахстану. Результати ефективності моделі SWIM для рівнинних річок показали, що модель добре відтворює динаміку модельованого стоку з спостереженням та рекомендована до практичного застосування в оперативній практиці, зокрема для прогнозування паводків та посух [18].

Окрему роль відіграють *стохастичні моделі*, які моделюють часову змінність маловоддя як випадковий процес. Вони дозволяють оцінювати ймовірність екстремальних посух та періодів дефіциту води. До такого виду моделей належать авторегресивні моделі ковзного середнього (ARMA, ARIMA), які дозволяють описувати динаміку часових рядів на основі їх попередніх значень [4].

Відома також модель показника водної безпеки (The ISciences Water Security Indicator

Model, WSIM, США, 1997 р.) [19], яка дозволяє безперервно вести прогнозування водних аномалій на глобальній основі із завчасністю 1–9 місяців. При цьому модель WSIM використовує сезонні прогнози температури та опадів. WSIM визначає місця на земній поверхні у вигляді глобальних карт «гарячих точок», які зараз або за прогнозами відчуватимуть дефіцит або надлишок прісної води.

Як правило, чим точніше та детальніше модель описує гідрологічні процеси на водозборі річки, тим більше вхідних даних вона потребує. Однак, не завжди ці дані є у наявності, що часто і унеможливує використання подібних моделей на практиці, особливо в умовах обмеженості або відсутності даних стаціонарних спостережень за стоком річок.

Досліджувана територія Півдня України за ландшафтно – гідрологічним районуванням В.В. Гребеня [20] належить до ландшафтно – гідрологічних провінцій, зон і районів (табл.1), які мають певні особливості в розподілі кількості й співвідношенні тепла і вологи, в характері атмосферної циркуляції, відрізняються регіональними характеристиками кліматичних умов та ін.

Так, клімат визначає величину та вплив температури, опадів та потенційного випаровування протягом року. Низькі витрати води в річках виникають після періодів невеликої кількості опадів або коли опади випадають у вигляді снігу. Це призводить до зменшення кількості води, що зберігається в ґрунтах, водоносних горизонтах та озерах, і зменшення стоку в річку. Тривалість та швидкість виснаження залежить, як, від попередніх погодних умов, так й від гідрологічних процесів та властивостей зберігання вологи у водозбірному басейні [4]. Внаслідок постійно високих швидкостей випаровування кліматичний

дефіцит води після сухого сезону може зберігатися й у вологий сезон. Значний вплив кліматичних змін на маловоддя, проявляється у невеликому зменшенні кількості опадів у поєднанні зі збільшенням випаровування та температури повітря, що подовжує період маловоддя в річках.

Низькі витрати води часто описуються у річкових водозборах за сезоном їх виникнення, а саме може бути один або декілька сухих сезонів, коли виділяються один або декілька чітко виражених періодів низьких витрат [4]. У помірному кліматі найчастіший час для низької води – це кінець сухого сезону, коли суха погода може зберігатися протягом кількох тижнів. У посушливому та напівпосушливому кліматі, до якого відноситься крайній південь території, в межах Причорномор'я, поєднання невеликої кількості опадів та високого випаровування призводить до мінімальних річкових витрат води річок, часто з тривалими періодами нульового стоку протягом кількох місяців або, навіть, років.

Згідно географічного розташування водних об'єктів, що досліджуються, в межах ландшафтно-гідрологічних провінцій за районуванням в [20] та внутрішньорічного розподілу стоку наведені терміни гідрологічних сезонів, визначені в роботі [20] за рекомендаціями [21] та представлені у табл. 1. Автором [20] також проаналізовано зміни стоку річок України за два характерні періоди (до 1989 року і після нього) та встановлено, що відмінності у термінах сезонів спостерігаються для провінцій в межах степової посушливої ландшафтно-гідрологічної зони. При цьому весняний сезон в сучасний період настає у більш ранні строки (II–IV місяці), літній сезон став триваліший (V–VIII місяці), а зимовий скоротився до періоду (XII–I місяці).

Таблиця 1 – Терміни гідрологічних сезонів для ландшафтно-гідрологічних провінцій [20]

Table 1 – Hydrological season timeframes for landscape-hydrological provinces [20]

Ландшафтно-гідрологічна провінція за районуванням в [20] (водні об'єкти)	Гідрологічний сезон (місяці)			
	весняний	літній	осінній	зимовий
Дністровсько-Дніпровська (верхня і середня частини басейну Південного Бугу, до впадіння р.Савранки)	III–V	V–VIII	IX–XI	XII–II
Нижньобузько-Дніпровська (нижня частина басейну р. Південний Буг, водозбори річок міжріччя Дністра і Південного Бугу, правобережні притоки Дніпра)	II–IV	V–VIII	IX–XI	XII–I

Причорноморсько–Приазовська (пригирлові ділянки Південного Бугу і Причорноморські річки)	II–IV	V–VIII	IX–XI	XII–I
Дніпровсько–Сіверськодонецька (ліві притоки Нижнього Дніпра)	II–IV	V–VIII	IX–XI	XII–I

На річках Півдня України, що досліджуються в роботі, найнижчі значення меженного стоку характерні для літньо–осіннього періоду, коли відбувається поступове виснаження запасів підземних вод, які забезпечують живлення річок. У зимовий період межень, як правило, є дещо вищою завдяки додатковому надходженню талих вод під час відлиг. Водночас в окремі посушливі зими меженний стік може знижуватися до рівнів, близьких до літніх. Прогнози меженного стоку зазвичай складають після завершення весняного водопілля – у період, коли атмосферні опади практично відсутні, а підземна складова річкового стоку змінюється незначно в часі.

В публікації авторів цієї роботи [22] досліджено сучасні кліматичні зміни, які впливають на формування мінімального меженного стоку річок території Півдня України. Встановлено, що в сучасний кліматичний період (1991–2020 рр.) в порівнянні зі стандартною кліматичною нормою (у період 1961–1990 рр.) спостерігається підвищення температури – на сході території в середньому на 1,5–1,6 °С, в західній частині та в південних областях – на 0,9–1,1 °С, найбільші помітні зміни відмічені в літні та зимові сезони. Річна кількість опадів за два кліматичних періоди зменшилась в південних і західних областях на 28–41 мм, але ж на сході території вона збільшилася на 25–32 мм. В окремі сезони можуть спостерігатися й посухи, які виникають при тривалих бездощових періодах.

Просторово–часові узагальнення статистичних характеристик рядів мінімального меженного стоку річок Півдня України (від початку спостережень до 2020 року) [22] вказують, що починаючи із середини 1970–х років відбувся перехід від фази зниження до фази підвищення циклічних коливань мінімальних витрат води літньо–осінньої межени. Однак із 2007–2008 років у басейні р. Південний Буг, а з 2012–2016 років – у басейнах річок Причорномор'я та Нижнього Дніпра, знову спостерігається перехід до маловодної фази, яка тривала до 2020 року. Для зимового періоду межени характерною була маловодна фаза, що тривала до 1980–х років, після чого її змінила багатоводна. Починаючи з 2016–2018 років, мінімальні витрати води знову виявляють

тенденцію до зменшення, яка простежується до 2020 року [22].

Оперативна оцінка настання (ймовірності настання) маловоддя (гідрологічної посухи) основних річок України, відповідно Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя [8], здійснюється Українським гідрометеорологічним центром ДСНС України (УкрГМЦ) [23] та його основними підрозділами у створах діючих гідрологічних постів окремо для періоду весняного водопілля (лютий–травень) та меженного періоду (червень–листопад).

Обов'язковий перелік об'єктів та створів гідрологічних постів, для яких виконується оцінка водності для визначення настання (загрози настання) маловоддя (гідрологічної посухи) та яким загрожує його формування (при наявності таких) входять до складу Каталогу небезпечності гідрологічних явищ (Додаток 2 Положення [8]). Для території Півдня України, що досліджується в роботі, такий перелік з [8] наданий в табл. 2.

Оперативна оцінка маловоддя виконується за результатами щоденних гідрометеорологічних даних, з огляду погоди та стихійних гідрометеорологічних явищ на території України, у їх порівнянні до середньої багаторічної та екстремальної водності річок відповідного календарного місяця чи сезонну, об'ємів весняного водопілля, опублікованих режимних видань багаторічних даних спостережень (БДС). Такий аналіз оцінки настання (загрози настання) маловоддя здійснюється в основних та допоміжних *критеріях настання та впливу маловоддя* на сектори економіки, населення, навколишнє природне середовище (згідно Додатку 1 Положення [8]).

При підготовці оперативної інформації та висновку щодо формування та впливу маловоддя на сектори економіки, населення, навколишнє природне середовище УкрГМЦ [23] оцінюють поєднання комплексу усіх критеріїв (по відношенню до місячної норми, норми наймаловоднішого місяця, до екологічної витрати води) [8].

Інформування про настання чи загрозу настання маловоддя виконується й з урахуванням складених гідрологічних довгострокових та короткострокових прогнозів (консультацій,

уточнень) та попереджень (максимальних витрат та об'ємів весняного водопілля, середніх місячних / декадних витрат води) в прогностичних створах, оцінки прогнозованого інтервалу водності по відношенню до опублікованих в БДС середніх багаторічних

значень та до критеріїв маловоддя з метою завчасного і більш детального інформування про настання / загрозу настання маловоддя [8].

Таблиця 2 – Перелік основних водних об'єктів та гідрологічних постів за витратами води, в яких виконується оцінка водності для визначення настання (ймовірності настання) маловоддя (гідрологічної посухи) (Додаток 2 Положення [8])

Table 2 – List of major water bodies and hydrological gauging stations by water discharge, used for streamflow assessment to determine the occurrence (probability of occurrence) of streamflow deficit (hydrological drought) (Annex 2 of the Regulation [8])

№з/п	Річка (водосховище)	Пост	Гідрометеорологічні організації, які виконують оцінку водності	
			Оцінка елементів весняного водопілля	Оцінка водності меженного періоду
1	Оріль	Царичанка	УкрГМЦ	УкрГМЦ
2	Самара	Кочеріжки	УкрГМЦ	УкрГМЦ
3	Інгулець	Кривий Ріг	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ
4	Південний Буг	Тростянич	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ
5	Південний Буг	Підгір'я	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ
6	Південний Буг	Олександрівка	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ
7	Синюха	Синюхин Брід	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ
8	Інгул	Кропивницький	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ

3. ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження. Досліджувана територія Півдня України охоплює річки басейну Південного Бугу та суббасейну Нижнього Дніпра, річки Північно – Західного Причорномор'я [24, 25]. Відповідно до фізико-географічного районування України розглядувана територія розташована в межах лісостепової і степової географічних зон [24], що обумовлює широку різноманітність природних умов (кліматичних, гідрогеологічних, орографічних і гідрографічних) формування гідрологічного режиму річок. Слід зазначити, що з метою цілісності басейну Південного Бугу в дослідженні залучена ще й верхня його частина, що розташована у зоні широколистяних лісів.

При розробці й удосконаленні територіальної методики прогнозування середньодекадних витрат води в період літньо-осінньої та зимової межени для завчасної оцінки маловоддя та ймовірності його настання на річках Півдня України використані дані про витрати води в основних гідрометричних створах річок, по яких ведеться розробка прогностичної методики, за переліком дещо ширшим, ніж у табл.2 та представленим в [9]. Згідно рекомендацій ВМО [8] часові рамки вимог до даних про річковий

стік у дослідженнях маловоддя, при зазвичай відносно не великій протягом періодів маловоддя швидкості зміни потоку використовуються дані з добовою роздільною здатністю (середньодобовий стік), тижневі (7-денний середній стік), 10-денні та місячні (середньомісячний стік). При цьому часові ряди повинні бути якомога довшими, а саме тривалістю 30 років або більше [6]. Подібні вимоги до тривалості ретроспективного періоду щодо розробки методик прогнозування річкового стоку встановлено й в вітчизняних керівних документах [26, 27].

Тому до дослідження були прийняті дані гідрологічних спостережень за стоком води основних річок території (щоденні та середні за декади й місяці, характерні витрати води) за багаторічний період спостережень з 1980 до 2020 рр., що розміщені в офіційних виданнях Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського [28], а саме в [29, 30]. Часові ряди стокових спостережень подовжено до 2020 р. з метою удосконалення методики територіальних прогнозів межених витрат води, яка представлена в роботах [9, 10].

В керівництвах ВМО [4, 7, 31], а також в керівних документах [26, 27] значна увага приділяється перевірці справдженості та якості гідрологічних прогнозів, виявляючи

сильні та слабкі сторони методики, а з'ясування деякої невизначеності та помилок прогнозів спрямовують до удосконалення систем прогнозування, що зрештою дозволяють приймати більш обґрунтовані та ефективні рішення при використанні прогностичної інформації.

В такому разі аналіз водності річок та оперативне прогнозування стоку в меженний період року відбувалося за територіальною методикою прогнозування меженних витрат води й у період до 2025 р. за даними Українського Гідрометцентру ДСНС України [23], що сформовані в автоматизованій, спеціально розробленій системі керування гідрологічними даними у вигляді текстових файлів (у електронній таблиці Microsoft Excel), у базі даних АРМ-гідро [32].

Методичні основи прогнозів меженного стоку витікають з закономірностей процесу поступового виснаження води, що зберігається у водозбірному басейні в періоди з невеликою кількістю опадів або їх відсутністю та відображається у формі кривої спаду гідрографа стоку.

Стійкість кривих спаду паводків при інерційності підземного живлення та незначному припливі води в річкову мережу дозволяє широко застосовувати методи екстраполяції ходу рівнів і витрат води по тенденції їх зміни, яка обумовлена запізненням реакції річкового стоку на зміну кліматичних умов та зберігається протягом деякого часу й дає фізичну підставу прогнозування гідрологічних процесів [4, 9].

Екстраполяція ходу рівнів і витрат води спаду повені або паводків у часі за рахунок виснаження запасів води (метод тенденцій) можна описати рівнянням вигляду [4, 33]

$$Q_t = (Q_0 - q) \cdot e^{-\alpha t} + q, \quad (1)$$

де Q_t – витрата у замикаючому створі річки в момент часу t ; Q_0 – витрата води в річці в початковий момент часу t_0 , м³/с; q – базисна витрата, яка обумовлена глибоководним живленням, м³/с; t – час в добах від моменту часу t_0 , на який приймається початкова витрата води Q_0 ; α – параметр, який є показником інтенсивності виснаження підземних вод.

Параметри α і q залежать від гідрогеологічних умов і змінюються для різних за площею басейнів. Так, параметр α

зменшується зі збільшенням площ водозборів та змінюється з року в рік у зв'язку зі змінами запасів ґрунтових вод.

У всіх цих випадках залежності, що враховують закономірності ходу рівнів (витрат) води в даному створі протягом попереднього періоду часу (метод тенденцій) будують за даними за невеликий період часу і коефіцієнти постійно уточнюють, що знижує їх об'єктивність і утруднює використання в прогнозах. Рівняння (1) частіше використовують в період підйому рівнів води для прогнозів з малою завчасністю.

Слід зазначити, що екстраполяція на невеликий період дає задовільні результати для крупних річок, де підйом і спад рівня характеризується плавністю і великою тривалістю. Можливість упевненого екстраполювання рівня або витрати води на середніх річках значно зменшується вважаючи на різкі і нетривалі підйоми і спади рівня води. Метод тенденцій ж на малих річках, з середньою тривалістю стійких підйомів і спадів 5–6 діб, не може бути використаний навіть при завчасності прогнозу, що дорівнює однієї доби.

Враховуючи, що на території Півдня України, що розглядається переважають річки із площею водозборів 500–2000 км² (їх 31), <500 км² – 9 постів, також 9 постів із площею водозборів 2000–5000 км², і площу водозбору > 10000 км² – займають 6 постів, тобто ті, що згідно з Водним кодексом України [2] відносяться до середніх (з площею водозборів 2–50 тис. км²) і малих (за розміром водозборів менше 2 тис. км²) річок [34] в роботі був застосований метод прогнозу меженного стоку [9], заснований на розрахунку характеристик кривої спаду стоку води в період межені. При цьому, з використанням щоденних даних стоку річки встановлюються зв'язки пар значень – запасів води в річковій мережі чи попередньої витрати води в момент часу t (як показника запасів води на водозборі й в руслі) та витрати води в наступний період її зміни (наприклад, середніх витрат води за період часу Δt).

Для річок Півдня України у літній та осінній періоди, як для зони недостатнього зволоження при невеликій кількості опадів або малої змінності їх кількості розробка методики прогнозу меженного стоку полягає в будові залежностей вигляду [9, 33]

$$\bar{Q}_{t+\Delta t} = f(W_t) \quad (2)$$

або

$$\bar{Q}_{t+\Delta t} = f(Q_t), \quad (3)$$

де $\bar{Q}_{t+\Delta t}$ – середня витрата води за період часу Δt , $\text{м}^3/\text{с}$; W_t – запас води в річковій мережі на дату випуску прогнозу t , м^3 ; Q_t – витрата води у замикаючому створі річки на дату випуску прогнозу t , $\text{м}^3/\text{с}$.

Наявність такої залежності для конкретної річки встановлюють шляхом побудови залежностей типу (2) або (3) на основі багаторічних рядів спостережень та подальшої оцінки статистичної точності отриманої прогнозової залежності. Подібні залежності, як правило, формують окремо для кожного місяця літнього й осіннього періодів, що дає змогу врахувати особливості гідрометеорологічних умов формування меженного стоку в межах різних гідрологічних сезонів. Точність прогнозів у такому разі буде вищою за умови меншого впливу дощових опадів на формування меженного стоку в літньо–осінній період у межах досліджуваного району. Для зимового сезону межені слід додатково враховувати надходження до руслової мережі талих і дощових вод, пов'язаних із зимовими відлигами, що у прогнозних розрахунках реалізувати доволі складно.

Просторова неоднорідність умов формування стоку, як акцентується в керівництвах ВМО [4, 7], зумовлює необхідність застосування методів ймовірного підходу до оцінки прогнозних величин та геоінформаційного аналізу представлення прогностичної продукції.

Задача встановлення забезпеченості або ймовірності перевищення (ймовірності настання) прогнозних величин у багаторічному розрізі ($P\%$), що є особливо важливим при оцінці виникнення маловоддя річок вирішується в даному методі шляхом побудови емпіричних кривих забезпеченості середніх витрат води меженного періоду за багаторічними рядами стокових спостережень [35].

З метою ж просторового аналізу прогнозних величин меженного стоку та моніторингу очікуваної водності в періоди маловоддя річок в роботі обґрунтований картографічний метод при регіональному узагальненні прогнозних модулів стоку річок Півдня України ($\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$) та прогнозних ймовірностей їх настання у багаторічному розрізі ($P\%$). Просторовий аналіз дозволяє ідентифікувати зони підвищеного ризику дефіциту водних ресурсів і формує основу для прийняття управлінських рішень.

ВМО вважає одним із ключових напрямів визначення екологічно допустимого стоку

(environmental flow), який забезпечує підтримання функціонування водних екосистем [4]. Мінімальні витрати води використовуються як базовий критерій для встановлення екологічних обмежень у регулюванні водокористування.

Оперативна оцінка настання маловоддя річок в Україні здійснюється за встановленими критеріями маловоддя (Додаток 1 Положення ...[8]).

Основним критерієм маловоддя для середньомісячної витрати води у меженний період є величина 20 % і менше норми відповідного місяця тривалістю 1 місяць та більше. Але в критичних ситуаціях у меженний літньо–осінній період, коли маловоддя утримується (за основним критерієм) упродовж місяця та довше, додатково виконують оцінку місячної водності за допоміжними критеріями оцінки настання маловоддя, тобто порівняно з величиною 20 % норми наймаловоднішого місяця літньо–осіннього періоду (періоду відкритого русла) тривалістю 1 місяць та більше, а також за досягнення, утримання значення екологічної витрати води та зменшення нижче неї упродовж 1 місяця і більше, незалежно від фази гідрологічного режиму/періоду року [8].

Наймаловоднішим місяцем літньо–осіннього періоду річок у багаторічному розрізі (за даними режимних видань [29, 30]) є, головним чином, серпень місяць для річок басейну Південного Бугу і річок Причорномор'я та вересень – для річок суббасейну Нижнього Дніпра (за винятком р. Інгулець, для якого наймаловоднішим є місяць жовтень).

За визначенням в Положенні .. [8], екологічна витрата води є критичним показником для функціонування екосистеми річки. Значення екологічної витрати води є сталим розрахованим показником для кожного гідрологічного поста на річках та згідно [36] обчислюється як 75% середньої витрати наймаловоднішого місяця меженного періоду року 95% забезпеченості (за об'ємом річного стоку).

4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Річки території Півдня України, особливо в межах Північно–Західного Причорномор'я є недостатньо вивченими у гідрологічному відношенні [9]. В керівництві ВМО [4] регіоналізація є ключовим підходом у випадках недостатності спостережень або їх відсутності на

конкретних водозборах. Основна ідея полягає у використанні гідрологічно однорідних регіонів для узагальнення статистичних характеристик маловоддя між басейнами з подібними фізико-географічними умовами. Регіональні моделі дозволяють підвищити надійність оцінок мінімального стоку та зменшити невизначеність прогнозів.

З метою завчасної оцінки водності річок у періоди гідрологічної межні запропоновано територіальну методику прогнозування середніх декадних витрат води річок Півдня України [9, 10], а в цьому дослідженні її удосконалено при часовому розширенні періоду літньої межні, тобто включенні травня місяця (згідно табл. 1), подовженні часових рядів витрат води станом до 2020 року, а також перевірки методики прогнозу на незалежних даних в період до 2025 р. Обґрунтовано підходи до просторової оцінки маловоддя та ймовірності її настання у сучасний період водності річок території, що розглядається.

4.1 Обґрунтування та аналіз територіальних прогнозних залежностей меженного стоку річок Півдня України

В основу прогнозу меженного стоку річок Півдня України покладено метод прогнозу, заснований на розрахунку характеристик виснаження стоку води в період межні у вигляді регіональних залежностей середньодекадних витрат води у замикаючому створі річки у вигляді (3). В якості предиктора прийнята витрата води на останній день попередньої декади (на дату складання прогнозу), що характеризує руслові запаси води в річці, які підлягають процесу виснаження в період завчасності прогнозу. У зв'язку з тим, що діапазон площ опорних водозбірних басейнів суттєво коливається (від 1130 км² р. Рів – с. Демидівка до 24600 км² р. Південний Буг – с. Підгір'я) побудова регіональних прогностичних залежностей виконувалася в одиницях питомого стоку – модулів стоку води.

В роботі, за вихідними даними про щоденні та середньодекадні витрати води для кожного місяця літнього, осіннього і зимового гідрологічних сезонів, згідно табл.1 (за період з травня по січень) по опорним гідрологічним постам річок Півдня України [9] побудовані узагальнені прогностичні залежності у вигляді

$$\bar{q}_{t+\Delta t} = f(q_t), \quad (4)$$

де $\bar{q}_{t+\Delta t}$ – середній модуль стоку води за період часу Δt , л/(с·км²); q_t – модуль стоку у замикаючому створі річки на дату випуску прогнозу t , л/(с·км²).

Такі емпіричні сезонні залежності декадного стоку встановлюються за даними багаторічних гідрологічних спостережень та ведеться оцінка точності отриманих прогнозних залежностей. Дата складання прогнозу декадного стоку t , на яку визначається величина q_t , береться 10, 20–те, чи 30(31)–те число кожного місяця, а період часу для завчасності прогнозу Δt становить 10 діб (в межах однієї календарної декади).

Обґрунтування та територіальне узагальнення прогнозних залежностей меженного стоку для річок Півдня України здійснено відповідно географічного розташування водних об'єктів в межах ландшафтно-гідрологічних провінцій за районуванням в [23], які мають певні кліматичні особливості в розподілі кількості й співвідношенні тепла і вологи. При аналізі угруповань річкових басейнів при побудові територіальних залежностей враховані також результати статистичної кластеризації кількості опадів за місяці у літній [37], осінній [38] і зимовий [39] сезони року, відповідно закономірностям розподілу опадів територією з карто-схемою районування місячної кількості опадів на території України.

Таке районування території України дало авторам [37-39] можливість деталізувати загальний кліматичний розподіл атмосферних опадів упродовж окремих календарних сезонів, а також виокремити території з різними типовими умовами формування погодних процесів, пов'язаних із випадінням опадів. Авторами [39] встановлено, що кластеризація атмосферних опадів, у зимовий період (грудень–січень), коли відбувається накопичення твердих опадів, виявляє окремі однорідні особливості їх формування для лівобережної та правобережної частин Півдня України, у межах яких виділяються два самостійні кластери. У травні ж місяці на всій досліджуваній території спостерігаються близькі за характером умови формування опадів, унаслідок чого всі області об'єднуються в межах одного кластеру. В літні [37] й осінні [38] місяці при більш неоднорідному розподілі опадів на даній території виділено по 3–4 кластери клімато-географічних особливостей розподілу опадів. Отже, протягом більшої частини року, за винятком травня, простежується

формування декількох груп часових рядів, для яких характерна схожа динаміка змін атмосферних опадів [37, 39].

Аналіз побудованих в роботі регіональних прогностичних залежностей показав, що для місяців з травня по січень має місце розкид точок відносно лінії регресії, але деякі точки розташовані нерівномірно по відношенню до інших, про що свідчать межі допустимих похибок для кожного місяця. Для прикладу представлено територіальну прогностичну залежність для річок басейну р. Південний Буг (верхня та середня течії) для серпня місяця (рис.1).

На точність прогностичних графіків у вигляді $\bar{q}_{t+10} = f(q_t)$ літнього, осіннього та зимового стоку в межах певної території впливає варіація опадів. Під час побудови цих графіків обсяг опадів визначають за двома джерелами: фактичними даними на час складання прогнозу та синоптичним прогнозом на поточну декаду. При цьому особливості будови річкової системи враховуються через специфіку методів розрахунку стокоформуєчих опадів при неодноразовності їх добігання з різновіддалених частин водозбору до замикаючого створу річки [33].

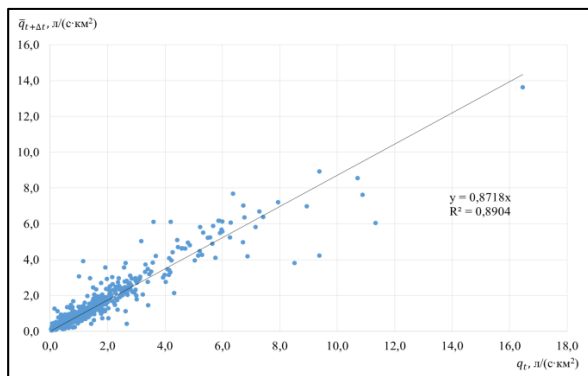


Рис. 1 – Територіальна залежність для короткострокових прогнозів середньодекадних модулів меженного стоку річок басейну р. Південний Буг (верхня та середня течії) (для серпня місяця) (1980–2020 рр.)

Fig. 1 – Territorial relationships for short-term forecasting of mean decade low-flow runoff modules for the rivers of the Southern Bug River basin (upper and middle reaches) (for August) (1980–2020)

За критерій якості методики короткострокових прогнозів меженного стоку рівнинних річок території прийняте відношення середньої квадратичної похибки S до середнього квадратичного відхилення σ_{Δ} й забезпеченості допустимої похибки $P\%$ [26, 27, 31].

Територіальна методика короткострокових прогнозів середньодекадних витрат води меженного літнього, осіннього та зимового стоку річок Півдня України має задовільну якість при інтервалі коливання критерію якості методики S/σ_{Δ} на рівні 0,71 – 0,82 та забезпеченості допустимої похибки перевірних прогнозів $P\%$ в межах 74–87%.

Слід зазначити, що подовження рядів спостережень за витратами води до 2020 р. суттєво не змінило результат оцінки методики для ряду до 2015 р. [9], у зв'язку з продовженням маловодного періоду у наступні роки [22]. Також спостерігається висока забезпеченість перевірних оцінок прогностичної методики для літнього і осіннього періодів, особливо в південних і західних областях території, що розглядається, де кількість річних опадів зменшилась в сучасний кліматичний період [22]. Для зимового сезону характерними є відлиги, що порушують режим межені при надходженні тало-дошових вод та впливають на точність прогнозів середньодекадних витрат води річок цього гідрологічного сезону.

4.2 Оцінка настання маловоддя річок Півдня України

Територіальна методика прогнозування межених витрат води дозволяє здійснювати поточне прогнозування витрат води та оцінювати настання (ймовірності настання) маловоддя річок протягом меженного періоду в різні його сезони, оскільки воно негативно впливає на життєдіяльність населення та екологічну ситуацію на водних об'єктах. Як було вказано вище, оперативна оцінка настання (ймовірності настання) маловоддя (гідрологічної посухи) здійснюється відповідно Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя [8].

З метою оперативної оцінки ймовірності настання маловоддя річок в прогностичному методі здійснюється встановлення забезпеченості або ймовірності перевищення прогностичних величин у багаторічному періоді ($P\%$). З цією метою побудовані емпіричні криві забезпеченостей середньомісячних модулів стоку в літній, осінній та зимовий сезони межені (за період 1981–2020 рр.). Такі криві узагальнені для басейнів річок Півдня України відповідно угрупованню прогностичних залежностей за територією. Ймовірність настання низьких

витрат води у багаторічному періоді $P\%$ встановлюється по кривих емпіричного розподілу для прогнозних модулів середньодадних витрат води (рис.2).

Особливістю емпіричного розподілу середньомісячних витрат води річок Північно-Західного Причорномор'я (на прикладі рр. Тилігул та Великий Куяльник) є те, що при забезпеченості меженних витрат води на рівні 30 % в малих та середніх річках території спостерігається відсутність стоку у всіх сезонах межени, тобто річки пересихають або перемерзають (рис.2). При цьому категорія «Пересихання (відсутність стоку) упродовж 1 місяця і більше» відмічена у Додатку 1 «Визначення критеріїв маловоддя» Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя [8].

Просторовий моніторинг очікуваних меженних витрат води, у тому числі при настанні маловоддя здійснюється в прогностичному методі при картографічному представленні прогнозних модулів стоку ($\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$) річок Півдня України та їх ймовірнісних характеристик ($P\%$), що дозволяє здійснювати оцінку водності очікуваної межени річок у будь-якій частині території, незалежно від стану її гідрометеорологічної вивченості.

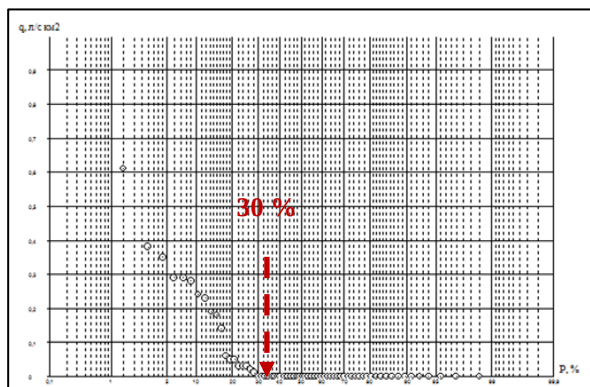


Рис. 2 – Емпіричний розподіл середньомісячних модулів стоку періоду літньої межени річок Причорномор'я (за період 1981–2020 рр.)

Fig. 2 – Empirical distribution of mean monthly summer low-flow runoff modules in Black Sea rivers (for the period 1981–2020)

На кожну дату складання прогнозу за територіальною методикою будуються карти ізоліній прогнозних величин середньодадних витрат води (модулів стоку $\bar{q}_{t+10}$) та їх ймовірнісних характеристик ($P\%$) по опорних гідрологічних створах, по яких ведеться прогнозування стоку води (наприклад, при

використанні програми Surface Mapping System Surfer Version 11.6.1159).

Розподіл по території прогнозних величин середньодадних модулів стоку літньої межени (наприклад, для третьої декади серпня 2025 р.) та їх прогнозних забезпеченостей на річках Півдня України – рр. Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра представлений на рис. 3.

Так, у третій декаді серпня 2025 р. прогнозовані модулі стоку $\bar{q}_{t+10}$ змінювалися в верхів'ях Південного Бугу від 0,4–0,2 $\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ при забезпеченості $P\%$ 80–90% і нижче (в басейні р.Синюха). В південній нижній течії Південного Бугу, річок північно-західного Причорномор'я та на лівобережній частині території (в басейнах рр. Оріль і Самара) прогнозні величини становили 0,2 $\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ і менше при забезпеченості $P\%$ 80–90 %. Слід відзначити, що для річок Тилігул і Великий Куяльник у третю декаду серпня 2025 р. прогнозувалося їх пересихання, але забезпеченість нульових модулів стоку становить 30% (як показано на рис.3 а і б).

В басейні р. Інгулець, у зв'язку із значною зарегульованістю річки каскадом водосховищ прогнозні модулі стоку були достатньо високими і коливалися в межах 0,8–2,0 $\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ при високій забезпеченості (при $P\% = 50\text{--}30\%$).

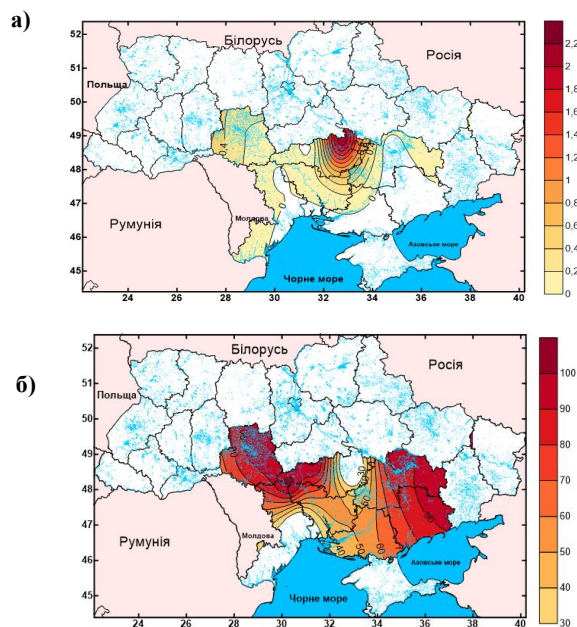


Рис. 3 – Розподіл по території Півдня України а) прогнозних величин середньодадних модулів стоку періоду літньої межени ($\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$) та б) їх забезпеченості ($P\%$) у третій декаді серпня 2025 р.

Fig. 3– Spatial distribution across Southern Ukraine of a) forecast mean decade summer low-flow runoff modules ($\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$) and b) their probability of exceedance ($P\%$) in the third decade of August 2025

Таким чином, використання таких карт ізоліній прогнозних модулів меженних витрат води забезпечує можливість проведення просторового аналізу водності річок у меженний період на території Півдня України, включаючи й ті річки, які не охоплені гідрологічними спостереженнями. Розподіл по території прогнозних забезпеченостей меженних витрат води дає уявлення про ймовірнісні характеристики виникнення низьких витрат води у багаторічному періоді в цілому по регіону Півдня України.

Для оперативної оцінки настання маловоддя річок, зняті з карт ізоліній (для центру тяжіння водозбору) прогностичні величини середньодадних модулів стоку періоду межени (рис.3а) повинні порівнюватися, відповідно Положення про порядок оцінки та інформування маловоддя... [8], з встановленими основними (іноді й додатковими) критеріями маловоддя (Додаток 1 Положення ...[8]).

Результати перевірних прогнозів середньодадних витрат води річок Півдня України здійснені в роботі для третьої декади серпня 2025 року. Аналіз гідрометеорологічних умов 2025 року [40, 41] показав, що межень літа

— осені відзначалася тривалістю, глибиною та просторовим поширенням. Річки території Півдня України перебували у маловодному стані безперервно майже з зими та весни до жовтня, а на деяких річках території й у листопаді місяці витрати води були нижчими та значно нижчими за місячну норму або близькими до критеріїв маловоддя. На річках Півдня України (у степових і лісостепових районах) водність не перевищувала 40–20% і менше, що створило напружену гідрологічну ситуацію у цьому році, ускладнило водогосподарське забезпечення та зумовило розвиток гідрологічної посухи.

Для оцінювання настання маловоддя річок у третій декаді серпня 2025 року в роботі виконане порівняння прогнозних середньодадних витрат води із встановленими в [8] критеріями маловоддя річок.

Так, за основним критерієм (20 % і менше норми серпня місяця тривалістю 1 місяць та більше) прогнозовані витрати води майже по всіх річках території (за винятком р. Інгулець при її зарегульованості водосховищами) попередньо вказували на настання маловоддя річок Півдня України, причому із завчасністю 10 діб.

За допоміжними критеріями маловоддя прогнозовані середньодадні витрати води у третю декаду серпня 2025 р. майже по всіх річках території також вказували на формування маловоддя на річках, їх значення були близькими або меншими за значення 20 % норми наймаловоднішого місяця літньо–осіннього періоду (періоду відкритого русла) (рис.4а) та досягали та утримувалися значень розрахункових екологічних витрат води (рис.4б).

Ймовірності настання прогнозних значень витрат води річок Півдня України (рис.4б) – в основному 85–95% і нижче (для річок Північно-Західного Причорномор'я на рівні 30%, що відповідає їх пересиханню (відсутності стоку) [8]). В басейні ж р. Інгулець при значній зарегульованості річки каскадом водосховищ при достатньо високих прогнозних модулях стоку відмічалася їх висока забезпеченість – на рівні 30% і вище.

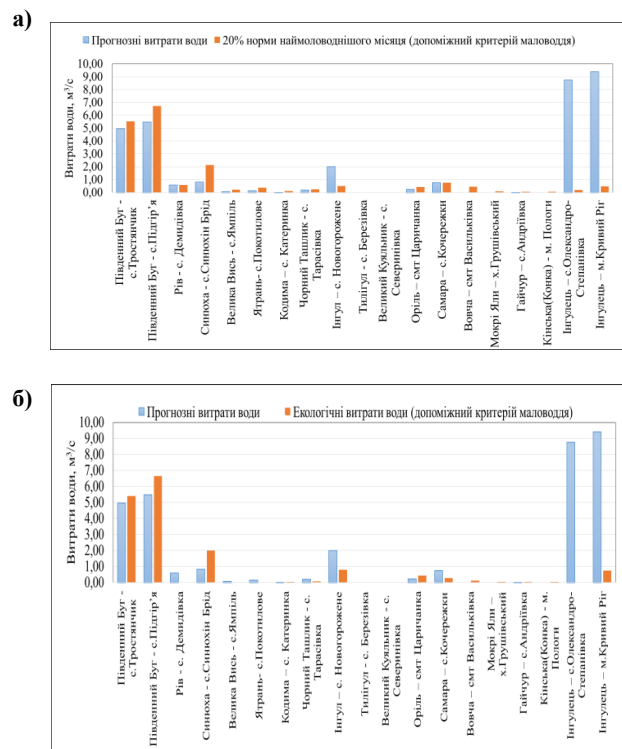


Рис. 4 – Порівняння прогнозних середньодадних витрат води із допоміжними критеріями маловоддя: а) 20 % норми наймаловоднішого місяця літньо–осіннього періоду і б) розрахунковими екологічними витратами води на річках Півдня України для третьої декади серпня 2025 року

Fig. 4 – Comparison of forecast mean decade water discharges with auxiliary streamflow deficit criteria: a) 20% of the long-term mean for the driest month of the summer–autumn period, and b) calculated ecological flows for the rivers of Southern Ukraine for the third decade of August 2025

Такі результати свідчать про можливість попередньої оцінки формування настання маловоддя чи гідрологічної посухи річок Півдня України на основі територіальної методики прогнозу меженних витрат води річок території. Ймовірнісні ж характеристики меженного стоку $P\%$ дають змогу надавати оцінку можливого виникнення (ймовірності настання) маловоддя у багаторічному періоді.

5. ВИСНОВКИ

1. В результаті виконаного дослідження удосконалено територіальну методику короткострокового прогнозування середньодадних витрат води річок Півдня України шляхом подовження рядів гідрологічних спостережень до 2020 року, уточнення сезонних територіальних залежностей, розширення часових меж літнього гідрологічного сезону (при включенні травня місяця), перевірки прогнозової методики на незалежних даних в період до 2025 р.

2. Встановлено, що сучасні кліматичні зміни на території Півдня України супроводжуються підвищенням температури повітря, зміною режиму атмосферних опадів та посиленням дефіциту водних ресурсів, що призводить до зниження меженного стоку річок і збільшення ризику формування маловоддя.

3. Доведено, що використання територіальних прогнозних залежностей дозволяє враховувати особливості формування меженного стоку в різних фізико-географічних умовах Півдня України та забезпечує можливість оперативного прогнозування водності річок навіть за обмеженої кількості гідрологічних даних.

4. Оцінка якості прогнозної методики показала її задовільну ефективність: значення критерію якості S/σ становлять 0,71–0,82, а забезпеченість допустимої похибки перевірних прогнозів досягає 74–87 %, що підтверджує можливість практичного застосування методики в оперативній гідрологічній практиці.

5. Встановлено, що найбільш складна ситуація з водністю формується для річок Північно-Західного Причорномор'я, де в посушливі періоди спостерігаються випадки пересихання або відсутності стоку.

6. Побудовані емпіричні криві забезпеченості меженних витрат води дозволяють оцінювати ймовірність настання маловоддя у багаторічному розрізі та можуть бути використані для завчасного інформування про розвиток гідрологічної посухи.

7. Запропонований картографічний підхід до просторового представлення прогнозних модулів стоку та їх забезпеченості надає можливість моніторингу водності річок, включаючи й періоди маловоддя, навіть у недостатньо вивчених районах та оцінювати райони найбільшого ризику розвитку гідрологічної посухи.

8. Результати дослідження мають практичне значення для діяльності гідрометеорологічних і водогосподарських організацій та можуть бути використані при управлінні водними ресурсами, екологічному моніторингу річкових басейнів і розробленні адаптаційних заходів до змін клімату.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради «Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики» від 23 жовтня 2000 року.
https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text URL: (дата звернення: 20.01.2026)
2. Водний кодекс України. Кодекс України, Закон, Кодекс від 06.06.1995 № 213/95–ВР Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, № 24, Ст. 79 із змінами, внесеними згідно із Законами № 1641–VIII від 04.10.2016, № 1054–IX від 03.12.2020 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 20.01.2026)

3. Водна стратегія України на період до 2050 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 9 грудня 2022 р. № 1134-р. – Офіційний вебпортал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80> (дата звернення: 25.01.2026).
4. Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational hydrology report (OHR). No. 50. WMO-No. 1029. 2008. 138 p. URL: <https://library.wmo.int/rec-ords/item/32176-manual-on-low-flow-estimation-and-prediction> (дата звернення: 07.02.2026)
5. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1992: *International Glossary of Hydrology*. Second edition, UNESCO, Paris.
6. Tallaksen, L.M. and H.A.J. van Lanen (eds), 2004: *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Developments in Water Science, 48, Elsevier Science B.V., Amsterdam.
7. Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction WMO-No. 1274, 2021 edition, World Meteorological Organization, 2021. 77 p. URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/57915> (дата звернення: 15.02.2026)
8. Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя (гідрологічну посуху) на водних об'єктах суші України. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2020. 13 с. введено в дію наказом УкрГМЦ № 123 від 14 грудня 2020 р.
9. Екстремальні гідрологічні явища на річках Півдня України: розрахунки і прогнози : монографія / за ред. В.А. Овчарук та Ж.Р. Шакирзанової. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2024. 674 с. URL: <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/13144/>
10. Шакирзанова Ж.Р., Овчарук В.А., Докус А.О., Кущенко Л.В., Тимко О.С. Ймовірісно-прогностичний метод для визначення меженних витрат води річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*, серія «Геологія. Географія. Екологія». Вип. 57. 2022. С. 251–267. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-19>
11. Lindström G. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. December 1997. *Journal of Hydrology* 201(1–4):272–288. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00041-3.
12. Guo, J.; Zhang, F.; Li, W.; Yang, A.; Fan, Y.; Li, J. Runoff Prediction in the Xiangxi River Basin Under Climate Change: The Application of the HBV-XGBoost Coupled Model. *Water* 2025, 17(16), 2420. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17162420>
13. Estimation of uncertainty sources in the projections of Lithuanian river runoff / Kriauciuniene J., Jakimavicius D., Sarauskienė D. et al. *Stoch Environ Res Risk Assess.* 2013. 27. Pp. 769–784. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0608-7>
14. Liu, T.; Si, Z.; Zhao, Y.; Wang, J.; Liu, Y.; Wang, L. Drought Propagation and Risk Assessment in the Naoli River Basin Based on the SWAT-PLUS Model and Copula Functions. *Sustainability* 2025, 17, 8219. p.1–28. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17188219>
15. Pedretti, D.; Camera, C.A.S.; Libera, N.D.; Pasini, S.; Gelmini, Y.; Braidot, A. High-Resolution Flow and Nutrient Modeling Under Climate Change in the Flat, Urbanized and Intensively Cultivated Adige River Lowland Basin (Italy) Using SWAT. *Hydrology*. 2025, 12, 239. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology12090239>
16. Nourani, V., Abbasi, H., Salehi, A.H. et al. Reconstructing Hydrological Drought Using SWAT, Deep Learning Models, and SSI. *Water Resour Manage* 40, 211 (2026). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04372-7>
17. Maragkaki, A.; Nerantzaki, S.D.; Jayyousi, A.; Halasah, S.; Albalawneh, A.; Hamdi, L.; Lilli, M.A.; Efstathiou, D.; Naimat, M.A.; Jaafreh, S.A.; et al. Hydrological and Geochemical Modeling of Water Availability and Quality in the Jordan Valley Under Climate Change. *Water* 2026, 18, 721. DOI: <https://doi.org/10.3390/w18060721>
18. Нурбашина А.А., Дидовец Ю., Лобанова А. Адаптация гидрологической модели SWIM для прогнозирования стока равнинных рек Казахстана во время паводков/половодья. *Гидрометеорология и экология*. № 3. 2019. С. 45–59.
19. Segura C., Caldwell P., Sun G., McNulty S., and Zhang Y.. A model to predict stream water temperature across the conterminous usa. *Hydrol. Process.*, 29:2178–2195, 2015. DOI: [doi:10.1002/hyp.10357](https://doi.org/10.1002/hyp.10357).
20. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ: Ніка-Центр, 2010. 316 с.
21. Галущенко Н.Г. Гидрологические и водно-балансовые расчеты. Київ: Вища шк. Головное изд-во, 1987. 248 с.
22. Блага А.О., Шакирзанова Ж.Р. Просторово-часові узагальнення статистичних характеристик рядів мінімального меженного стоку річок Півдня України. *Наук.-прак. журн.: Екологічні науки*. 2025. № 59. С. 43–55. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.6>
23. Інформаційний портал Українського гідрометеорологічного центру Державної служби України з надзвичайних ситуацій. URL: <https://meteo.gov.ua> (дата звернення: 10.05.2026 р.).
24. Фізична географія Української РСР / за ред. А.М. Маринича. Київ : Вища школа, 1982. 208 с.
25. Атлас України : Кер. проекту Л.Г. Руденко, В.С. Чабанюк, А.І.Бочковська. Інститут географії Національної академії наук України і Товариство з обмеженою відповідальністю «Інтелектуальні системи ГЕО», Інтелектуальні Системи ГЕО, 1999–2000. URL: <http://www.isgeo.kiev.ua> (дата звернення: 18.04.2026)
26. Настанова з оперативної гідрології. Прогнози режиму вод суші. Гідрологічне забезпечення і обслуговування. Керівний документ. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2012. 120 с.
27. Оцінювання якості методики та точності (справджуваності) прогнозів режиму поверхневих вод суші / Керівний документ. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2015. 70 с.
28. Офіційний сайт Центральної геофізичної обсерваторії ім. Бориса Срезневського URL: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/index.php?fn=maps-ukraine&f=php&p=1> (дата звернення: 15.03.2026).
29. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2016–2020 рр. та весь період спостережень). Ч. 1. Річки. Вип. 1. Басейн Вісли, Дунаю, Дністра, Південного Бугу, річки Причорномор'я: Довідкове видання. Київ, 2023. 465 с.
30. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2016–2020 рр. та весь період спостережень). Ч. 1. Річки. Вип. 2. Басейн Дніпра: довідкове видання. Київ, 2023. 294 с.

31. Guidelines on the Verification of Hydrological Forecasts. WMO-No. 1364. World Meteorological Organization, 2025 edition, 205 p. URL: <https://wmo.int/media/news/wmo-issues-guidelines-verification-of-hydrological-forecasts> (дата звернення: 15.12.2025).
32. Бойко В.М., Кульбіда М.І., Адаменко Т.І. Використання геоінформаційних технологій в оперативній гідрометеорології // *Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія*. 2010. Вип. 18. С. 25–30.
33. Шакіризанова Ж.Р. Довгострокові гідрологічні прогнози: конспект лекцій. Одеса: Вид-во ТЕС, 2010. 154 с. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/98>
34. Хільчевський В.К., Гребін В.В., Манукало В.О. Гідрологічний словник. Київ: ДІА, 2022. 236 с.
35. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С., Овчарук В.А. Гідрологічні розрахунки: підручник. Одеськ. державний екологічний університет. Одеса: ТЕС. 2014. 484 с. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/6078>
36. Роз'яснення щодо порядку визначення допоміжного критерію оцінки маловоддя – екологічної витрати води. Український гідрометеорологічний центр ДСНС України (УкрГМЦ). Методичний лист від 18.12.2020 р. № 99001–1550/99024.
37. Гончарова Л.Д., Прокоф'єв О.М. Статистичний підхід до вирішення задач клімато-географічних особливостей розподілу опадів літнього сезону на території України. *Наук.-прак. жур.: Екологічні науки*. 2022. №1 (40). С. 134–139. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.24>
38. Прокоф'єв О.М., Гончарова Л.Д. Клімато-географічні особливості розподілу опадів на території України в осінній період. *Наук.-прак. жур.: Екологічні науки*. 2021. № 2 (35). С. 94–98. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9156>
39. Гончарова Л.Д., Прокоф'єв О.М., Решетченко С.І. Особливості клімато-географічного розподілу атмосферних опадів на півдні України. *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Сер.: Геологія. Географія. Екологія*. Вип. 57. 2022. С.81–94. URL: <https://periodicals.karazin.ua/geoeeco/article/view/21374/19946>
40. Шакіризанова Ж.Р., Блага А.О. Прогноз водності річок при дефіциті водних ресурсів на Півдні України. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «Кліматичні зміни та сталий розвиток сільського господарства»*, 19 вересня 2025 року, м. Одеса, Україна. Одеса: Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства НААН, 2025. С. 97–100. DOI: <https://www.doi.org/10.32782/19092025>
41. Кущенко Л.В., Блага А.О., Овчарук В.А., Шакіризанова Ж.Р. Умови формування та прогноз маловоддя на річках Півдня України в 2025 році. *Матеріали до 80-ої звітної наукової конференції професорсько- викладацького складу і наукових працівників ОНУ імені І. І. Мечникова*. (Одеса, 26–28 лист. 2025 р.) [Електронний ресурс]. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,7 МБ). – Одеса: Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2025. С. 79–83.
- 06.06.1995 № 213/95-VR Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR), 1995, № 24, St. 79 iz zminamy, vnesenymy zghidno iz Zakonamy № 1641-VIII vid 04.10.2016, № 1054-IX vid 03.12.2020. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (Accessed: 20.01.2026) (in Ukr.)
3. Order № 1134-p of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 23 December 2022 On Approval of the Water Strategy of Ukraine until 2050 // Verkhovna Rada of Ukraine. 12.09.2022. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (Accessed: 27.03.2026) (in Ukr.)
4. Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational hydrology report (OHR). No. 50. WMO-No. 1029. 2008. 138 r. Available at: <https://library.wmo.int/records/item/32176-manual-on-low-flow-estimation-and-prediction> (Accessed: 07.02.2026)
5. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization (1992): International Glossary of Hydrology. Second edition, UNESCO, Paris.
6. Tallaksen, L.M. and H.A.J. van Lanen (eds) (2004): Hydrological Drought - Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Developments in Water Science, 48, Elsevier Science B.V., Amsterdam.
7. Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction WMO-No. 1274, 2021 edition, World Meteorological Organization, 2021. 72 p. Available at : <https://library.wmo.int/idurl/4/57915> (Accessed: 15.02.2026)
8. Polozhennia pro poriadok otsinky ta informuvannia pro malovoddia (hidrolohichnu posukhu) na vodnykh ob'ekтах sushi Ukrainy. Kyiv: Ukrainskyi hidrometeorologichnyi tsentr, 2020. 13 s. vvedeno v diiu nakazom UkrHMTs № 123 vid 14 hrudnia 2020 r. (in Ukr.)
9. Ovcharuk, V. A., Shakirzanovoi, Zh. R. (2024). Ekstremalni hidrolohichni yavyshcha na richkakh Pivdnia Ukrainy: rozrakhunky i prohnozy [Extreme Hydrological Events on Rivers of Southern Ukraine: Assessment and Forecasting]. Odessa: ODEKU. Available at : <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/13144/> (in Ukr.)
10. Shakirzanova, Zh.R., Ovcharuk, V.A., Dokus, A.O., Kushchenko, L.V., Tymko, O.S. (2022) Ymovirnisno-prohnostychnyi metod dlia vyznachennia mezhennykh vytrat vody richok Pivdennoho Buhu, Prychornomoria ta Nyzhnoho Dnipro. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina, seria «Heolohiia. Heohrafiia. Ekolohiia». Vyp.57. Pp. 251-267. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-19> (in Ukr.)
11. Lindström, G. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. Journal of Hydrology 201(1-4):272-288. DOI: [10.1016/S0022-1694\(97\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00041-3)
12. Guo, J.; Zhang, F.; Li, W.; Yang, A.; Fan, Y.; Li, J. (2025). Runoff Prediction in the Xiangxi River Basin Under Climate Change: The Application of the HBV-XGBoost Coupled Model. Water , 17(16), 2420. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17162420>
13. Kriauciuniene, J., Jakimavicius, D., Sarauskiene, D. Estimation of uncertainty sources in the projections of Lithuanian river runoff / et al. Stoch Environ Res Risk Assess. 2013. 27. Pp. 769–784. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0608-7>.
14. Liu, T.; Si, Z.; Zhao, Y.; Wang, J.; Liu, Y.; Wang, L. (2025). Drought Propagation and Risk Assessment in the Naoli River Basin Based on the SWAT-PLUS Model and Copula Functions. Sustainability, 17, 8219. r.1-28. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17188219>

REFERENCES

1. Dyrektyva 2000/60/TeS Yevropeiskoho Parlamentu i Rady «Pro vstanovlennia ramok diialnosti Spivtovarystva v haluzi vodnoi polityky» vid 23 zhovtnia 2000 roku. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text (Accessed: 20.01.2026) (in Ukr.)
2. Vodnyi kodeks Ukrainy. Kodeks Ukrainy, Zakon, Kodeks vid

15. Pedretti, D.; Camera, C.A.S.; Libera, N.D.; Pasini, S.; Gelmini, Y.; Braidot, A. (2025). *High-Resolution Flow and Nutrient Modeling Under Climate Change in the Flat, Urbanized and Intensively Cultivated Adige River Lowland Basin (Italy) Using SWAT*. Hydrology. 12, 239. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology12090239>
16. Nourani, V., Abbasi, H., Salehi, A.H. et al. (2026). *Reconstructing Hydrological Drought Using SWAT, Deep Learning Models, and SSI*. Water Resour Manage 40, 211. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04372-7>
17. Maragkaki, A.; Nerantzaki, S.D.; Jayyousi, A.; Halasah, S.; Albalawneh, A.; Hamdi, L.; Lilli, M.A.; Efstathiou, D.; Naimat, M.A.; Jaafreh, S.A.; et al. (2026). *Hydrological and Geochemical Modeling of Water Availability and Quality in the Jordan Valley Under Climate Change*. Water, 18, 721. DOI: <https://doi.org/10.3390/w18060721>
18. Nurbatsyna, A.A., Dydovets, Yu., Lobanova, A. (2019). *Adaptatsiya hidrolohicheskoi modeli SWIM dlia prohnozuvannya stoka ravnynnykh rek Kazakhstana vo vremia pavodkov/polovodia*. Hydrometeorologiya y ekolohiia. № 3. Pp. 45-59.
19. Segura, C., Caldwell, P., Sun G., McNulty, S., and Zhang, Y. (2015). *A model to predict stream water temperature across the conterminous usa*. Hydrol. Process. 29:2178–2195. DOI: [doi:10.1002/hyp.10357](https://doi.org/10.1002/hyp.10357)
20. Hrebin, V. V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrainy (landshaftno-hidrolohichniy analiz) [Modern water regime of Ukrainian rivers (landscape and hydrological analysis)]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. Pp. 316. (in Ukr.)
21. Halushchenko N.H. (1987). *Hydrolohicheskoye y vodno-balansovyye raschety [Hydrological and water balance calculations]*. Kyiv: Vyshcha shk. Holovnoye yzd-vo (in Rus.)
22. Blaha, A.O., Shakirzanova, Zh.R. (2025). *Prostorovochasovi uzahalnennia statystychnykh kharakterystyk riadiv minimalnogo mezhennoho stoku richok Pivdnia Ukrainy*. Nauk.-prak. zhur.: Ekolohichni nauky. № 59. Pp. 43-55. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.6> (in Ukr.)
23. *Informatsiyni portal Ukrainskoho hidrometeorologichnogo tsentru Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychaynykh sytuatsii*. Available at : <https://meteo.gov.ua> (Accessed: 10.05.2026).
24. *Fizychna heohrafiia Ukrainskoi RSR (1982) / za red. A.M. Marynychy*. Kyiv : Vyshcha shkola (in Ukr.)
25. *Atlas Ukrainy : Ker. proektu L.H. Rudenko, V.S. Chabaniuk, A.I.Bochkovska*. Instytut heohrafiy Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy i Tovarystvo z obmezhenoiu vidpovidalnistiu «Intelektualni systemy HEO», Intelektualni Systemy HEO, 1999-2000. URL: <http://www.isgeo.kiev.ua> (Accessed: 18.04.2026)
26. *Nastanova z operativnoi hidrolohii. Prohnozy rezhymu vod sushi. Hidrolohichne zabezpechennia i obsluhovuvannia. Kerivnyi dokument*. Kyiv: Ukrainskyi hidrometeorologichnyi tsentr, 2012. P. 120.
27. *Otsiniuvannia yakosti metodyky ta tochnosti (spravdzhuvanosti) prohnoziv rezhymu poverkhnevnykh vod sushi / Kerivnyi dokument*. Kyiv: Ukrainskyi hidrometeorologichnyi tsentr, 2015. Pp. 70.
28. *Ofitsiyni sait Tsentralnoi heofizychnoi observatorii im. Borysa Sreznevskoho*. Available at: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/index.php?fn=maps-ukraine&f=php&p=1> (Accessed: 15.03.2026).
29. *Derzhavnyi vodnyi kadastr. Bahatorichni dani pro rezhym ta resursy poverkhnevnykh vod sushi (za 2016-2020 rr. ta ves period sposterezhen)*. Ch. 1. Richky. Vyp. 1. Basein Visly, Dunaui, Dnistra, Pivdennoho Buhu, richky Prychornomoria: Dovidkove vydannia. Kyiv, 2023. P. 465.
30. *Derzhavnyi vodnyi kadastr. Bahatorichni dani pro rezhym ta resursy poverkhnevnykh vod sushi (za 2016-2020 rr. ta ves period sposterezhen)*. Ch. 1. Richky. Vyp. 2. Basein Dnipra: dovidkove vydannia. Kyiv, 2023. Pp. 294 .
31. *Guidelines on the Verification of Hydrological Forecasts*. WMO-No. 1364. World Meteorological Organization, 2025 edition, 205 p. Available at : <https://wmo.int/media/news/wmo-issues-guidelines-verification-of-hydrological-forecasts> (Accessed: 15.12.2025).
32. Boiko, V.M., Kulbida, M.I., Adamenko, T.I. (2010). *Vykorystannia heoinformatsiynykh tekhnolohii v operativnii hidrometeorolohii*. Hidrolohiiia, hidrokhimiiia, hidroekolohiia. Vyp. 18. Pp. 25-30. (in Ukr.)
33. Shakirzanova, Zh.R. (2010) *Dovhostrokovii hidrolohichniy prohnozy [Long-term hydrological forecasts]: konspekt lektsii*. Odesa: Vyd-vo TES. Available at: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/98> (in Ukr.)
34. Khilchevskiy, V.K., Hrebin, V.V., Manukalo, V.O. (2022). *Hidrolohichniy slovnyk [Hydrological dictionary]*. Kyiv: DIA, P. 236 . (in Ukr.)
35. Hopchenko, Ye. D., Loboda, N. S., & Ovcharuk, V. A.(2014). *Hidrolohichni rozrakhunky [Hydrological calculations]*. Odesa: TES. Available at: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/6078> (in Ukr.)
36. *Roziasnennia shchodo poriadku vyznachennia dopomizhnogo kryteriiu otsinky malovoddia – ekolohichnoi vytraty vody. Ukrainskyi hidrometeorologichnyi tsentr DSNS Ukrainy (UkrHMTs)*. Metodychnyi lyst vid 18.12.2020. № 99001-1550/99024. (in Ukr.)
37. Honcharova, L.D., Prokofiev, O.M. (2022). *Statystychni pidkhdid do vyrishennia zadach klimato-heohrafichnykh osoblyvosti rozpodilu opadiv litnogo sezonu na terytorii Ukrainy*. Nauk.-prak. zhur.: Ekolohichni nauky. №1 (40). S. 134-139. Available at: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.24> (in Ukr.)
38. Prokofiev, O.M., Honcharova, L.D. *Klimato-heohrafichni osoblyvosti rozpodilu opadiv na terytorii Ukrainy v osinnii period*. Nauk.-prak. zhur.: Ekolohichni nauky. 2021. № 2 (35). S. 94-98. Available at: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/9156> (in Ukr.)
39. Honcharova, L.D., Prokofiev, O.M., Reshetchenko S.I. (2022). *Osoblyvosti klimato-heohrafichnogo rozpodilu atmosfernykh opadiv na pivdni Ukrainy*. Visnyk KhNU im. V.N. Karazina. Ser.: Heolohiia. Heohrafiia. Ekolohiia. Vyp. 57. Pp. 81-94. Available at: <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/21374/19946> (in Ukr.)
40. Shakirzanova, Zh.R., Blaha, A.O. (2025). *Prohnoz vodnosti richok pry defitsyti vodnykh resursiv na Pivdni Ukrainy*. Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovy–praktychnoi konferentsii «Klimatichni zminy ta stalii rozvytok silskoho hospodarstva», 19 veresnia 2025 roku, m. Odesa, Ukraina. Odesa: Instytut klimatichno oriietovanoho silskoho hospodarstva NAAN. Pp. 97-100. DOI: <https://www.doi.org/10.32782/19092025> (in Ukr.)
41. Kushchenko, L.V., Blaha, A.O., Ovcharuk, V.A., Shakirzanova, Zh.R. (2025). *Umovy formuvannia ta prohnoz malovoddia na richkakh Pivdnia Ukrainy v 2025 rotsi*. Materialy do 80-oi zvitnoi naukovo konferentsii profesorsko- vykladatskoho skladu i naukovykh pratsivnykiv ONU imeni I. I. Mechnykova. (Odesa, 26–28 lyst. 2025 r.) [Elektronnyi resurs]. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 14,7 MB). Odesa: Odes. nats. un-t im. I. I. Mechnykova. Pp. 79-83. (in Ukr.)

THE TERRITORIAL METHOD OF FORECASTING THE LOW-FLOW DISCHARGE AND ASSESSMENT OF STREAMFLOW DEFICIT OCCASION OF SOUTHERN UKRAINE RIVERS

Zh. R. Shakirzanova, A. O. Blaha

Odesa I.I. Mechnikov National University
2 V. Zmienka Str., 65000, Odesa, Ukraine
jannetodessa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5657>

The paper investigates the features of low-flow discharge formation in the rivers of Southern Ukraine under current climate change conditions. It examines a territorial method for short-term forecasting of low-flow discharges and substantiates approaches to the spatial assessment of streamflow deficit and its probability of occurrence during the contemporary river water-bearing period. The relevance of the study is driven by the escalating water resource scarcity, the increasing frequency of hydrological droughts, and the urgent need for operational low-flow forecasting to ensure effective water resource management in the region.

The objective of the study is to improve the territorial method for forecasting mean decade (10-day) water discharges during the summer-autumn and winter low-flow periods (by extending the hydrological observation series, refining seasonal territorial relationships, and extending the temporal boundaries of the summer hydrological season), as well as to develop approaches for the spatial assessment of streamflow deficit and its probability of occurrence in the rivers of Southern Ukraine.

It is established that under current climate change conditions in Southern Ukraine, there is a downward trend in river low-flow discharge, which is associated with rising air temperatures and shifts in atmospheric precipitation patterns. This leads to an intensification of water resource scarcity and an increased risk of hydrological drought development.

The study utilizes long-term observation series of water discharges in the river basins of the Southern Bug, Lower Dnieper, and rivers of the North-Western Black Sea region for the period 1980–2020 when improving the forecasting methodology and in the period until 2025 – to test the methodology on independent data. The forecast method used is based on calculating the characteristics of water runoff depletion during the low water period in the form of regional relationships between initial and forecast runoff modules, statistical evaluation of the forecasting technique, and cartographic analysis of the spatial distribution of forecast characteristics were performed. To evaluate the probability of streamflow deficit occurrence, empirical curves of low-flow discharge probability of exceedance were constructed.

The findings indicate that the territorial method ensures satisfactory quality of short-term forecasts for mean decade water discharges, with a quality criterion ratio of $S/\sigma = 0,71\text{--}0,82$ and an admissible error confidence level of 74–87%. The continuation of the low-flow runoff phase in the contemporary climatic period has been detected, particularly for the rivers of the North-Western Black Sea region, where the drying up of small watercourses is observed in certain seasons. Spatial analysis of forecast runoff modules and their probability of exceedance allowed for the identification of areas at the highest risk of hydrological drought development.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of their application in the operations of hydrometeorological and water management organizations, water use planning, assessment of the ecological status of river basins, and the development of climate change adaptation measures.

Keywords: low-flow discharge, climate change, water supply, water deficit, forecasting, territorial method, streamflow deficit assessment, low-flow criteria, low-flow probability.

Подання до редакції : 18. 02. 2026
Надходження остаточної версії : 13. 04. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026

УДК 551.577.37:551.583.16(477.74), PACS: 92.60.Wc, 92.60.Ry

ІНДЕКСИ ETCCDI В ОДЕСЬКОМУ РЕГІОНІ ЗА РЕАНАЛІЗОМ ERA5-LAND ТА ДАНИМИ МЕТЕОСТАНЦІЙ: ТРЕНДИ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ЗА 1991–2020 РР.

А. Б. Семергей-Чумаченко

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Всеволода Змієнка, 2, 65082, Одеса, Україна,
alina.semerhei-chumachenko@onu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8718-4073>

Досліджено зміни режиму екстремальних опадів у Північно-Західному Причорномор'ї на основі десяти індексів ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices), розрахованих за даними реаналізу ERA5-Land (просторова роздільність $0,1^\circ$) за стандартний кліматичний період 1991–2020 рр. Для оцінювання трендів використано непараметричний критерій Манна-Кендалла з оцінюванням величини тренду за методом Сена. Просторовий аналіз виконано для сітки ERA5-Land у межах домену $46,0\text{--}47,5^\circ\text{N}$, $30,0\text{--}31,5^\circ\text{E}$; сезонний аналіз проведено окремо для холодного (листопад–березень) та теплого (квітень–жовтень) сезонів. Верифікацію результатів реаналізу здійснено шляхом порівняння з даними метеостанції Одеса (ECA&D, STAID: 400) за той самий період.

Річний трендовий аналіз виявив статистично незначущу при стандартному рівні $p < 0,05$, але виражену тенденцію до зменшення сумарних опадів у дощові дні (PRCPTOT: $-3,48$ мм/рік, $p = 0,064$). Сезонна декомпозиція трендів показала, що всі статистично значущі тренди зосереджені у теплому сезоні: зменшення PRCPTOT ($-2,60$ мм/рік, $p = 0,032$), скорочення кількості днів з опадами ≥ 10 мм (R10MM: $-0,088$ дн/рік, $p = 0,012$) та статистично незначуще при $p < 0,05$, але виражене збільшення тривалості сухих періодів (CDD: $+0,208$ дн/рік, $p = 0,094$). У холодний сезон значущих трендів не виявлено.

Просторовий аналіз трендів методом Манна-Кендалла виявив переважання значущого від'ємного сигналу для PRCPTOT та R10MM на більшій частині досліджуваного регіону, з найбільш вираженим зменшенням у північній та центральній частинах домену. Для індексу CDD просторовий розподіл трендів характеризується неоднорідністю: значущі позитивні тренди зафіксовано у східній частині регіону, тоді як прибережна зона демонструє незначущі від'ємні або нейтральні значення, що може свідчити про модифікуючий вплив акваторії Чорного моря. Для RX1DAY просторовий аналіз виявив значущі від'ємні тренди у північній частині регіону, що суперечить зростаючому тренду, зафіксованому на метеостанції Одеса ($+0,90$ мм/рік, $p = 0,010$), і вказує на обмеження реаналізу у відтворенні точкових екстремумів опадів. Верифікація за даними ECA&D показала задовільну узгодженість для індексів накопичених опадів (PRCPTOT: $R = 0,45$, $p = 0,012$; R10MM: $R = 0,51$, $p = 0,004$).

Отримані результати можуть свідчити про зростання посушливості теплового сезону в Північно-Західному Причорномор'ї у 1991–2020 рр., що узгоджується з регіональними тенденціями зменшення літніх опадів, характерними для Причорноморського та Середземноморського секторів. Виявлені тренди мають практичне значення для оцінювання водних ресурсів та агрокліматичних умов півдня України.

Ключові слова: реаналіз ERA5-Land, індекси ETCCDI, екстремальні опади, тренд Манна-Кендалла, Північно-Західне Причорномор'я, кліматична норма 1991–2020, сильні опади, регіональні зміни клімату.

1. ВСТУП

Зміни режиму атмосферних опадів є одним із найбільш значущих проявів сучасного регіонального кліматичного сигналу, особливо в зонах переходу між вологим помірним та посушливим середземноморським кліматами.

За даними Всесвітньої метеорологічної організації, Європа залишається одним із регіонів

світу з найбільш вираженими змінами кліматичних екстремумів, зокрема у частоті та інтенсивності екстремальних опадів [1].

Північно-Західне Причорномор'я розташоване у зоні переходу між вологим помірним та посушливим середземноморським кліматом [13, 14], що визначає його підвищену чутливість до змін у частоті та інтенсивності опадів. Одеський регіон, як один із найважливіших сільсько-

господарських районів України, зазнає значного впливу як дефіциту вологи в теплий сезон, так і епізодичних екстремальних опадів, що спричиняють паводки та ерозію ґрунтів [2, 3]. Зростання повторюваності та інтенсивності екстремальних гідрометеорологічних явищ у регіоні Чорного моря, зафіксоване в останні десятиліття, актуалізує необхідність кількісної оцінки змін режиму опадів на основі стандартизованих індексів та сучасних кліматичних продуктів.

Аналіз екстремальних кліматичних подій на основі стандартизованих індексів ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) є загальноприйнятим підходом у сучасній кліматології [4]. Ці індекси забезпечують порівняльність результатів між різними регіонами та дослідженнями, що робить їх особливо цінними для регіональних кліматичних оцінок. Для території України подібні дослідження проводились з використанням даних реаналізу ERA5 та наземних спостережень [8, 10, 11], однак просторово деталізовані оцінки для Одеського регіону на основі ERA5-Land за стандартний кліматичний період 1991–2020 рр. залишаються практично відсутніми.

Реаналіз ERA5-Land (ECMWF) з просторовою роздільністю $0,1^\circ$ є одним із найбільш деталізованих глобальних кліматичних продуктів, доступних для наукових досліджень [15, 16, 17]. Його перевагою є висока просторова роздільність порівняно з ERA5 ($0,25^\circ$), що є особливо важливим для регіонів зі складним рельєфом берегової зони та неоднорідним розподілом опадів. Водночас верифікація реаналізу за даними наземних спостережень залишається необхідним етапом будь-якого кліматичного дослідження, особливо для екстремальних характеристик опадів [18, 19].

Метою даного дослідження є визначення змін режиму екстремальних опадів в Одеському регіоні на основі індексів ETCCDI, розрахованих за даними реаналізу ERA5-Land за стандартний кліматичний період 1991–2020 рр., а також верифікація отриманих результатів за даними метеорологічної станції Одеса (ECA&D).

Вперше для Одеського регіону на основі реаналізу ERA5-Land ($0,1^\circ$) розраховано десять стандартних індексів ETCCDI за кліматичний період 1991–2020 рр. з покомірковим просторовим аналізом трендів методом Манна-Кендалла для всіх суходільних вузлів сітки у межах домену $46,0\text{--}47,5^\circ\text{N}$, $30,0\text{--}31,5^\circ\text{E}$. Вперше для регіону виконано сезонну декомпозицію трендів з розмежуванням холодного (листопад–

березень) та теплого (квітень–жовтень) сезонів, що дозволило виявити асиметрію кліматичного сигналу між сезонами. Проведено кількісну верифікацію результатів ERA5-Land за даними метеостанції Одеса-обсерваторія з оцінкою зміщення, RMSE та кореляції для ключових індексів, включаючи виявлення розходження трендів RX1DAY між реаналізом і метеорологічними спостереженнями як методологічного обмеження продукту для прибережної зони.

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи «Сталий розвиток управління і моделювання водних ресурсів Північно-Західного Причорномор'я в умовах зростання екстремальності клімату та антропогенного навантаження» (державний реєстраційний номер 0126U001796, 2026–2028 рр.), що визначає актуальність отримання базових кількісних оцінок змін режиму екстремальних опадів у регіоні за сучасний кліматичний період.

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Дослідження екстремальних опадів та їх змін у контексті глобального потепління активно розвивається у світовій кліматології. Методологічною основою таких досліджень є стандартизовані індекси ETCCDI, запропоновані спільною експертною групою WMO-CCL/CLIVAR. В 2003 р. А. М. G. Klein Tank та G. P. Können [5] одними з перших систематично застосовували ці індекси для аналізу трендів температурних та опадових екстремумів у Європі за 1946–1999 рр. на основі бази даних ECA та виявили неоднорідні просторові закономірності змін. У 2011 р. Zhang X. зі співавторами [4] узагальнили методологію розрахунку індексів ETCCDI та обґрунтували їх використання для моніторингу змін екстремумів клімату на глобальному та регіональному рівнях.

Для регіону Південно-Східної Європи та Північно-Західного Причорномор'я характерне зменшення опадів у теплий сезон на тлі зростання інтенсивності окремих екстремальних подій. Група румунських дослідників (Micu D.M., Amihaesei V.A., Milian N. та ін.) у 2021 р. [6] виявила значуще потепління при відсутності чітких трендів опадів при дослідженні зміна індексів ETCCDI у Південних Карпатах (Румунія) за 1961–2018 рр. Інша група (Ionita M. та ін.) виявила значущі від'ємні тренди середніх та екстремальних опадів для окремих станцій у прибережній зоні на півдні Румунії за 1961–2020 рр. [7], що узгоджується з результатами нашого дослідження.

Для території України дослідження екстрема-

льних опадів проводились переважно з використанням реаналізу ERA5 та даних метеостанцій. Агайар Е.В. та ін. в 2023 р. [8] проаналізував 82 події екстремальних опадів (≥ 100 мм/добу) над Україною за 1979–2019 рр., виявили що більшість з них відбувається влітку та пов'язана з вологопостачанням з Чорного та Середземного морів. Далі вчені розвинули цей аналіз із зосередженням на динамічних аспектах та великомасштабній циркуляції [9], що обумовлює екстремальні опади в Україні. Ця група вчених досліджувала екстремальні опади в Україні та для ідентифікації подій та розрахунку траєкторій вологи використовувала саме ERA5, що підтверджує, що для синоптичного аналізу реаналіз у нашому регіоні застосовується успішно, хоча для абсолютних значень опадів його використання може вимагати калібрування.

У роботі [10] здійснено просторово-часовий аналіз сильних опадів над Україною за 1979–2019 рр. за даними реаналізу ERA5. Встановлено просторову неоднорідність розподілу екстремальних опадів — максимальна повторюваність характерна для Карпатського регіону та південного узбережжя, тоді як степова зона, включаючи Причорномор'я, характеризується меншою частотою та нижчими значеннями добових максимумів. Отримані результати формують базові кліматологічні характеристики екстремальних опадів для України та слугують основою для регіональних досліджень, зокрема у Північно-Західному Причорномор'ї.

В 2020 р. Семергей-Чумаченко А.Б. та Слободяник К.Л. [11] аналізували виникнення сильних опадів (>30 мм/12 год) на станції Херсон за даними метеорологічних спостережень та реаналізу ERA5 за 2005–2021 рр. Виявлено 19 випадків сильних дощів, які відбувались виключно у теплий період року з максимальною повторюваністю у липні. Порівняно з 1961–1990 рр. кількість сильних дощів у 2005–2021 рр. зросла у червні та липні, але зменшилась у серпні. Встановлено, що більшість реальних випадків сильних опадів задовільно відтворюється реаналізом ERA5, однак приблизно у третині епізодів реаналіз не фіксував сильних опадів на координатах станції або центр опадів був зміщений. Цей результат є методологічно важливим для нашого дослідження, оскільки підтверджує відомі обмеження ERA5 у відтворенні точкових екстремумів опадів для окремих станцій Причорноморського регіону.

Регіональні кліматичні зміни в Північно-Західному Причорномор'ї досліджувались і в контексті температурного режиму. В 2025 р. в

роботі Гончарової Л.Д. та Прокоф'єва О.М. [12] проаналізовані весняні відгуки термічного режиму регіону на глобальні кліматичні зміни на прикладі станцій Одеської області, встановлено потепління на $1,1^{\circ}\text{C}$ від першого до другого тридцятиріччя. Боровська Г.О. та Хохлов В.М. у 2024 р. [13] створили набір кліматичних даних CP_OdU (Climate Projections for Odesa, Ukraine), що містить добові вихідні змінні з 102 модельних прогонів та 76 місячних (річних) індексів, розрахованих для 2021–2050 рр. для найближчої до Одеси суходільної точки сітки. Прогнозні дані засновані на 26 та 76 симуляціях для сценаріїв RCP4.5 та RCP8.5 відповідно, з 14 РКМ проекту EURO-CORDEX з просторовою роздільністю $\sim 0,11^{\circ}$ (~ 12 км). Короткий опис майбутнього клімату Одеси за сценарієм RCP8.5 демонструє тенденцію до формування середземноморського клімату — підвищення температури у поєднанні зі змінами внутрішньорічного розподілу опадів призведе до спекотного сухого літа та м'якої помірно вологої зими. Таким чином, результати [13] підтверджують та кількісно обґрунтовують довгострокову тенденцію до зменшення опадів теплого сезону в Одеському регіоні, виявлену у даному дослідженні на основі даних ERA5-Land за 1991–2020 рр.

Згідно з [14], південна та центральна Україна належить до регіонів з найбільш вираженим ризиком посушливості в Європі, що підкреслює актуальність досліджень режиму опадів у Причорномор'ї. В [14] (VI доповіді МГЕЗК (IPCC AR6, 2021)) наведено комплексну оцінку спостережуваних та прогнозованих змін екстремальних кліматичних явищ на глобальному та регіональному рівнях. Встановлено, що частота та інтенсивність екстремальних опадів зросли щонайменше у половині регіонів світу, включаючи Східну Європу (EEU). Вплив людини, зокрема емісія парникових газів, визначено як основний чинник спостережуваного глобального посилення інтенсивних опадів над суходолом.

Водночас для Середземноморського регіону (MED), до якого функціонально тяжіє Північно-Західне Причорномор'я, доповідь фіксує протилежну тенденцію: зменшення середніх опадів за останні десятиліття, при цьому знак та величина трендів суттєво залежать від досліджуваного часового інтервалу та конкретного регіону. Південна та центральна Україна входить до переліку регіонів з найбільш вираженим ризиком збільшення сільськогосподарських та екологічних посух при глобальному потеплінні на 2°C відносно доіндустріального рівня.

3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні використано погодинні дані реаналізу ERA5-Land [16] для змінної total precipitation за стандартний кліматичний період 1991–2020 рр. ERA5-Land є продуктом ECMWF, отриманим шляхом відтворення земної компоненти реаналізу ERA5 [15] з підвищеною просторовою роздільністю близько 9 км (0,1°) порівняно з 31 км (0,25°) для ERA5 [17]. Дані отримано через Copernicus Climate Data Store (CDS) з використанням офіційного API-інтерфейсу cdsapi для мови програмування Python. Просторовий домен дослідження охоплює територію 46,0–47,5°N, 30,0–31,5°E, що відповідає Одеській області та суміжним районам Північно-Західного Причорномор'я. Сітка ERA5-Land містить 16×16 комірок у межах домену, з яких виключено комірки над акваторією Чорного моря та лиманів, де дані відсутні. У контексті даного дослідження термін «Одеський регіон» вживається як географічне поняття і відповідає зазначеному просторовому домену сітки ERA5-Land, який охоплює переважну частину Одеської області (адміністративний центр — м. Одеса, 46°29'N, 30°44'E) та включає узбережжя Чорного моря і систему лиманів на півдні, степову зону у центральній та північній частинах. Термін не є тотожним адміністративним межам Одеської області і використовується виключно для позначення просторового домену аналізу.

Погодинні дані осадів (м/год) агреговано до суточних сум (мм/добу) шляхом підсумовування 24 годинних значень та переведення одиниць виміру. Дані завантажувались окремо для кожного року та об'єднувались у єдиний масив за допомогою бібліотеки xarray для Python.

Для верифікації результатів реаналізу використано дані метеостанції Одеса (ODESA_OBSERV, STAD: 400) з бази European Climate Assessment & Dataset (ECA&D). Станція розташована за координатами 46°26'N, 30°46'E на висоті 42 м над рівнем моря. Індеси ETCCDI для станції отримано безпосередньо з розділу «Indices of Extremes» порталу ECA&D за той самий період 1991–2020 рр.

Найближча суходільна комірka ERA5-Land до метеостанції розташована на відстані 9,3 км (46,4°N, 30,7°E). Слід зазначити, що просторове зміщення між точками порівняння, а також різниця в характері підстильної поверхні (безпосередня близькість станції до акваторії моря та лиманів) можуть частково обумовлювати виявлені розбіжності в трендах інтенсивних опадів.

Розраховано десять стандартних індексів ETCCDI [4], що характеризують різні аспекти режиму опадів (табл. 1). Розрахунок виконано з використанням бібліотеки xclim для Python. Індеси R95p та R99p розраховано відносно перцентилів, обчислених по всьому базовому періоду 1991–2020 рр.

Таблиця 1 – Індеси ETCCDI, які використані у дослідженні
Table 1 – ETCCDI Indices Used in the Study

Індекс / Index	Визначення / Definition	Одиниці / Units
Rx1day	Максимальна добова сума опадів / Maximum 1-day precipitation amount	мм / mm
Rx5day	Максимальна сума опадів за 5 послідовних діб / Maximum 5-day precipitation amount	мм / mm
PRCPTOT	Річна сума опадів у дощові дні (≥ 1 мм) / Annual total wet-day precipitation	мм / mm
SDII	Середня інтенсивність опадів у дощові дні / Simple daily intensity index	мм/день / mm/day
R10mm	Кількість днів з опадами ≥ 10 мм / Number of heavy precipitation days	дні / days
R20mm	Кількість днів з опадами ≥ 20 мм / Number of very heavy precipitation days	дні / days
CDD	Максимальна тривалість сухого періоду (< 1 мм) / Maximum consecutive dry days	дні / days
CWD	Максимальна тривалість вологого періоду (≥ 1 мм) / Maximum consecutive wet days	дні / days
R95p	Кількість днів з опадами вище 95-го перцентилі / Days above 95th percentile	дні / days
R99p	Кількість днів з опадами вище 99-го перцентилі / Days above 99th percentile	дні / days

Для оцінювання статистичної значущості трендів використано непараметричний критерій Манна-Кендалла, який не вимагає нормального розподілу даних та є стійким до викидів, що робить його стандартним інструментом у кліматологічних дослідженнях [4, 5]. Величину трен-

ду оцінено за методом Сена (Sen's slope estimator). Рівень статистичної значущості прийнято $p < 0,05$; тренди з p у діапазоні 0,05–0,10 розглядались як такі, що наближаються до статистичної значущості. Трендовий аналіз виконано окремо для річних рядів та для холодного

(листопад–березень) і теплого (квітень–жовтень) сезонів. Просторовий аналіз трендів виконано для кожної суходільної комірки сітки ERA5-Land у межах домену.

Якість відтворення індексів ETCCDI реаналізом ERA5-Land оцінено шляхом порівняння з даними метеостанції Одеса за такими статистичними характеристиками: коефіцієнт кореляції Пірсона (R), зміщення (Bias = ERA5 – OBS) та середньоквадратична похибка (RMSE). Додатково порівняно тренди Sen's slope для обох наборів даних з метою оцінювання узгодженості кліматичного сигналу між реаналізом та наземними спостереженнями [18, 19].

4. РЕЗУЛЬТАТИ

Середні значення індексів ETCCDI для Одеського регіону за 1991–2020 рр., розраховані за даними ERA5-Land, характеризують кліматологічний фон екстремальних опадів у Північно-Західному Причорномор'ї (рис. 1, рис. 2).

Максимальна добова сума опадів (Rx1day) в середньому становить 67,4 мм при значному міжрічному розкиді — від 27,7 мм (мінімум) до 240,2 мм (максимум). Максимальна сума за п'ять послідовних діб (Rx5day) у середньому дорівнює 82,3 мм. Підвищені значення Rx1day у прибережній зоні узгоджуються з результатами [8], де встановлено що осередки екстремальних опадів над Україною у несезонні місяці концентруються переважно вздовж узбережжя Чорного та Азовського морів.

Річна сума опадів у дощові дні (PRCPTOT) становить у середньому 432,5 мм, що відповідає напівпосушливому кліматичному режиму регіону та узгоджується з даними метеостанції Одеса за ECA&D (447,5 мм). Для порівняння, у роботі [10] для південних районів України отримано близькі значення річних сум опадів за реаналізом ERA5, що підтверджує коректність використання ERA5-Land для регіону. Середня інтенсивність опадів у дощові дні (SDII) дорівнює 10,2 мм/день, що перевищує середньоєвропейське значення (~5–7 мм/день) та відображає конвективний характер опадів у теплий сезон, характерний для Причорноморського регіону [8].

Кількість днів з опадами ≥ 10 мм (R10mm) у середньому становить 11,6 дн/рік, з опадами ≥ 20 мм (R20mm) — 4,0 дн/рік. Порівняно з даними ECA&D для станції Одеса (R10mm = 13,4 дн/рік), ERA5-Land дещо занижує цей показник, що є типовою характеристикою сіткових продуктів реаналізу [18, 19].

Максимальна тривалість сухого періоду

(CDD) у середньому дорівнює 48,2 дні — найбільший серед усіх розрахованих індексів за тривалістю, що відображає виражену посушливість клімату регіону. Для порівняння, у роботі [6] для Південних Карпат середнє CDD становить 20–30 днів, тоді як для Середземноморського узбережжя сягає 60–80 днів; одержані значення для Одеського регіону займають проміжне положення, що відповідає перехідному характеру клімату Північно-Західного Причорномор'я. Максимальна тривалість вологого періоду (CWD) у середньому становить лише 2,3 дні, що свідчить про переривчастий характер опадових серій та підтверджує дефіцит тривалих вологих епізодів у регіоні.

Кількість днів з опадами вище 95-го перцентилу (R95p) становить у середньому 1,5 дн/рік, вище 99-го (R99p) — 0,3 дн/рік, що відповідає визначенню перцентильних порогів та свідчить про коректність розрахунку. Просторовий розподіл середніх значень індексів характеризується помітною неоднорідністю в межах досліджуваного домену: підвищені значення Rx1day та PRCPTOT спостерігаються у прибережній зоні та на заході регіону, тоді як CDD зростає у північному та східному напрямках (рис. 2). Ця просторова структура узгоджується із загальновідомим збільшенням континентальності клімату у напрямку від узбережжя Чорного моря вглиб суходолу [13, 14].

Результати трендового аналізу методом Манна-Кендалла для річних рядів індексів ETCCDI за 1991–2020 рр. наведено у табл. 2 та на рис. 2. Статистично значущих при стандартному рівні $p < 0,05$ трендів серед річних рядів не виявлено, що є характерним для аналізу 30-річних кліматичних рядів у регіонах з високою міжрічною мінливістю опадів [5, 14].

Найбільш значущим результатом річного аналізу є виражена, хоча й статистично незначуща при $p < 0,05$, тенденція до зменшення сумарних опадів у дощові дні (PRCPTOT: $-3,48$ мм/рік, $p = 0,064$). За 30 років це відповідає загальному зменшенню річної суми опадів приблизно на 104 мм, що є суттєвим для посушливого регіону. Подібні тенденції до зменшення PRCPTOT у Причорноморському регіоні відзначались і в роботі [7], де для південних станцій Румунії виявлено від'ємні тренди річних сум опадів, а також узгоджуються з прогнозованим зменшенням опадів у Середземноморському регіоні та суміжних територіях за сценаріями глобального потепління [14].

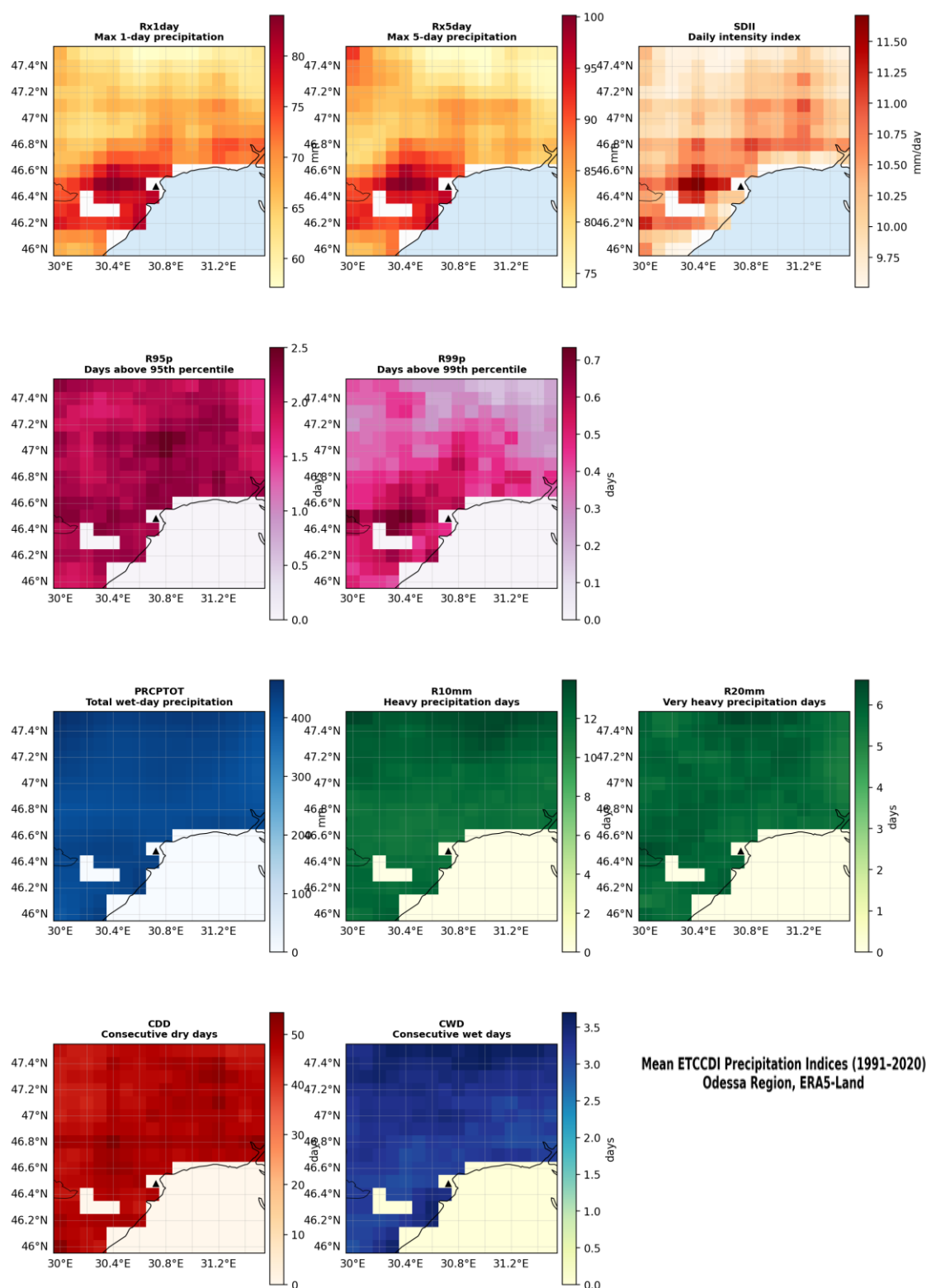


Рис. 1 – Просторовий розподіл середніх значень індексів ETCCDI за даними ERA5-Land для Одеського регіону (1991–2020): індекси інтенсивності (Rx1day, Rx5day, SDII), перцентильні індекси (R95p, R99p), індекси частоти та накопичення (PRCPTOT, R10mm, R20mm) та індекси тривалості (CDD, CWD). Трикутником позначено положення метеостанції Одеса (ECA&D); порожні комірки відповідають акваторії Чорного моря та лиманів у сітці ERA5-Land.

Fig. 1 – Spatial distribution of mean ETCCDI indices derived from ERA5-Land for the Odessa region (1991–2020): intensity indices (Rx1day, Rx5day, SDII), percentile-based indices (R95p, R99p), frequency and accumulation indices (PRCPTOT, R10mm, R20mm), and duration indices (CDD, CWD). The triangle marks the location of the Odessa meteorological station (ECA&D); empty grid cells correspond to the Black Sea and estuaries in the ERA5-Land grid.

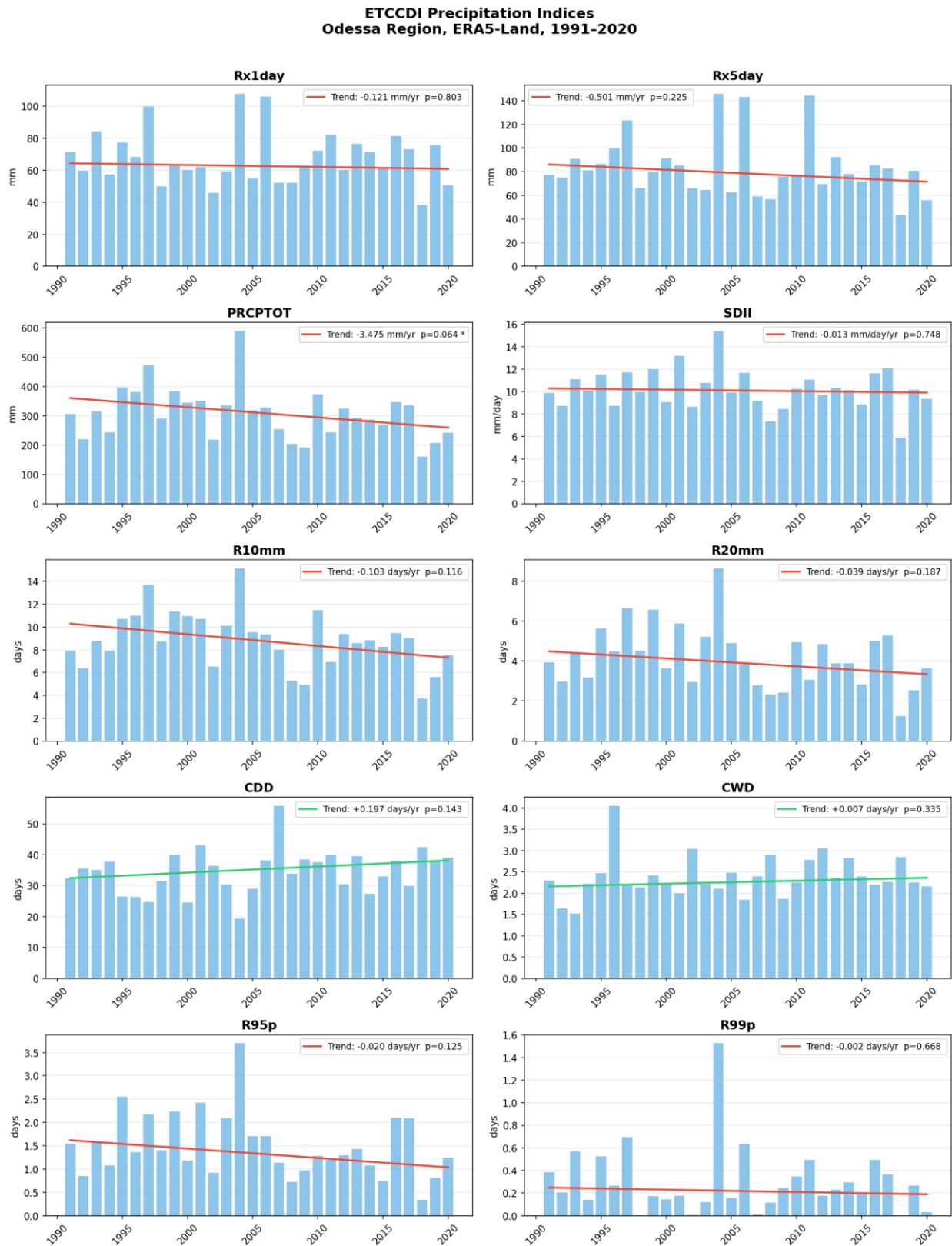


Рис. 2 – Річні ряди індексів ETCCDI за даними ERA5-Land для Одеського регіону (1991–2020). Столпчики — річні значення, усереднені по досліджуваному домену; лінії — тренди за методом Сена (червоний — від’ємний, зелений — додатний).

Зірочкою (*) позначено тренд на межі статистичної значущості ($p < 0.10$).

Fig. 2 – Annual ETCCDI precipitation indices derived from ERA5-Land for the Odessa region (1991–2020). Bars represent annual values averaged over the study domain; lines show Sen's slope trends (red — negative, green — positive).

Asterisk (*) denotes a trend approaching statistical significance ($p < 0.10$).

Таблиця 2 – Результати трендового аналізу річних рядів індексів ETCCDI (Mann-Kendall, 1991–2020)
Table 2 – Mann-Kendall Trend Analysis Results for Annual ETCCDI Indices (1991–2020)

Індекс	Нахил Сена	p-значення	Значущість
Rx1day	–0,121 мм/рік	0,803	—
Rx5day	–0,501 мм/рік	0,225	—
PRCPTOT	–3,475 мм/рік	0,064	~
SDII	–0,013 мм/день/рік	0,748	—
R10mm	–0,103 дн/рік	0,116	—
R20mm	–0,039 дн/рік	0,187	—
CDD	+0,197 дн/рік	0,143	—
CWD	+0,007 дн/рік	0,335	—
R95p	–0,020 дн/рік	0,125	—
R99p	–0,002 дн/рік	0,668	—

Примітка: ~ тренд на межі статистичної значущості ($0,05 < p < 0,10$); — тренд статистично незначущий ($p \geq 0,10$).

Для індексів частоти опадів — R10mm (–0,103 дн/рік, $p=0,116$) та R20mm (–0,039 дн/рік, $p=0,187$) — виявлено від'ємні тенденції, що свідчать про поступове зменшення кількості днів з помірно інтенсивними та сильними опадами. Аналогічні результати отримано в роботі [6] для Південних Карпат, де більшість індексів частоти опадів також демонструють від'ємні або нейтральні тренди за останні десятиліття, що свідчить про регіональний характер цього процесу.

Для індексів інтенсивності — Rx1day (–0,121 мм/рік, $p=0,803$) та SDII (–0,013 мм/день/рік, $p=0,748$) — тренди є незначущими та практично нульовими. Це означає, що, незважаючи на зменшення загальної кількості опадів, їхня середня інтенсивність у дощові дні суттєво не змінилась. Така картина — зменшення частоти опадів при збереженні інтенсивності — може відповідати характеристикам, що спостерігаються в регіонах із тенденцією до формування рис середземноморського типу клімату» [13, 14]. Водночас слід зазначити, що ERA5-Land може недооцінювати тренди інтенсивних опадів через просторове усереднення в межах комірки реаналізу [18, 19].

Для індексу максимальної тривалості сухого періоду (CDD) виявлено незначущу позитивну тенденцію (+0,197 дн/рік, $p=0,143$), що за 30 років відповідає збільшенню тривалості найдовшого сухого епізоду приблизно на 6 днів. Аналогічний сигнал подовження сухих серій характерний для всього Середземноморського регіону та Причорномор'я, що підтверджується як регіональними дослідженнями [6, 7], так і прогнозами МГЕЗК [14]. Для CWD тренд є практично

нульовим (+0,007 дн/рік, $p=0,335$), що свідчить про відсутність змін у тривалості вологих серій.

Для перцентильних індексів R95p (–0,020 дн/рік, $p=0,125$) та R99p (–0,002 дн/рік, $p=0,668$) тренди є від'ємними та статистично незначущими. Зменшення кількості днів з опадами вище 95-го та 99-го перцентилів при збереженні інтенсивності Rx1day може свідчити про зсув у розподілі екстремальних подій, однак для надійних висновків щодо цих змін 30-річного ряду є недостатньо — на що звертається увага і в роботі [5].

Загалом річний трендовий аналіз демонструє переважання від'ємного сигналу для більшості індексів опадів в Одеському регіоні за 1991–2020 рр., що узгоджується з загальною тенденцією до зменшення опадів Північно-Західного Причорномор'я та відповідає оцінкам регіональних кліматичних змін для Середземноморського та Причорноморського секторів [13, 14]. Відсутність статистичної значущості більшості трендів на рівні $p < 0,05$ пояснюється відносно коротким 30-річним рядом спостережень і значною міжрічною мінливістю опадів у регіоні, що є типовою характеристикою напівпосушливих зон [6, 7].

Сезонний аналіз виявив принципову асиметрію між холодним (листопад–березень) та теплим (квітень–жовтень) сезонами у характері трендів індексів ETCCDI за 1991–2020 рр. (рис. 3). Концентрація значущих кліматичних сигналів у теплому сезоні узгоджується з характером змін, що спостерігаються в регіонах через можливий вплив розширення субтропічного сухого поясу, і узгоджується з результатами досліджень для суміжних територій Румунії [7] та прогнозами МГЕЗК для Середземноморського регіону [14].

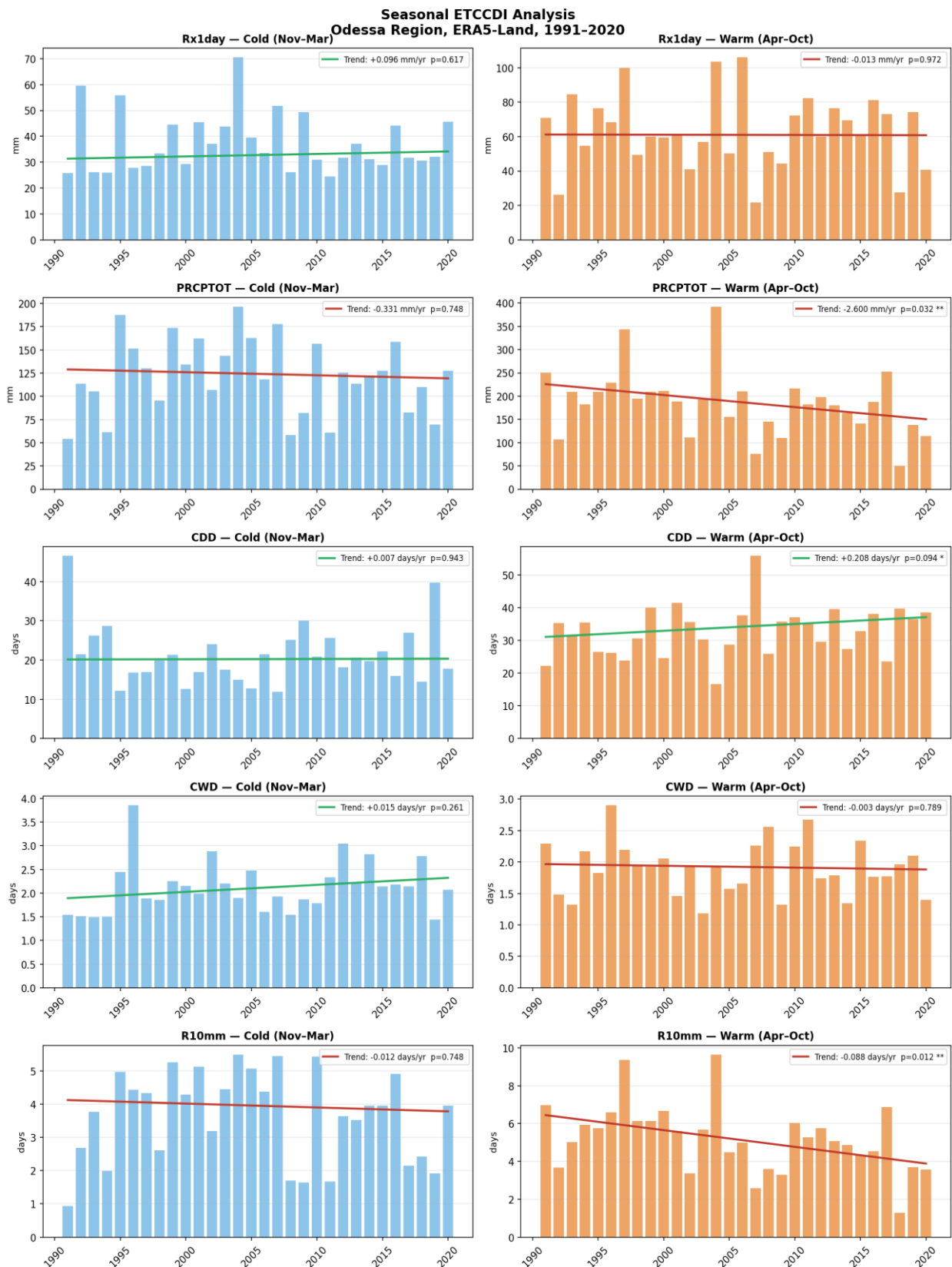


Рис. 3 – Сезонні індекси ETCCDI для Одеського регіону (ERA5-Land, 1991–2020): холодний сезон (листопад–березень, синій) та теплий сезон (квітень–жовтень, помаранчевий). Лінії — тренди за методом Сена; зірочками позначено статистичну значущість (* $p<0,1$; ** $p<0,05$).

Fig. 3 – Seasonal ETCCDI precipitation indices for the Odessa region (ERA5-Land, 1991–2020): cold season (November–March, blue) and warm season (April–October, orange). Lines show Sen's slope trends; asterisks denote statistical significance (* $p<0,1$; ** $p<0,05$).

У холодний сезон (листопад–березень) жодного статистично значущого тренду не виявлено для жодного з досліджуваних індексів. Тренди є практично нейтральними як для індексів кількості (PRCPTOT: $-0,331$ мм/рік, $p=0,748$), так і для індексів тривалості (CDD: $+0,007$ дн/рік, $p=0,943$; CWD: $+0,015$ дн/рік, $p=0,261$) та частоти (R10mm: $-0,012$ дн/рік, $p=0,748$). Стабільність холодносезонних опадів узгоджується з висновками роботи [8], де показано що більшість екстремальних опадових подій над Україною формується влітку та пов'язана з конвективними процесами, тоді як зимові опади визначаються великомасштабною адвекцією і є менш мінливими у часі. Результати роботи [12] також підтверджують що основні кліматичні зміни в Одеській області відбуваються переважно у теплий період року.

У теплому сезоні (квітень–жовтень) виявлено три статистично значущих або близьких до значущих сигнали, які формують узгоджену картину посушливості регіону.

По-перше, зафіксовано значуще зменшення сумарних опадів у дощові дні (PRCPTOT: $-2,60$ мм/рік, $p=0,032$). За 30 років це відповідає загальному зменшенню теплосезонних опадів приблизно на 78 мм, що є суттєвим для сільськогосподарського регіону з дефіцитом зволоження.

Подібне значуще зменшення літніх опадів виявлено у роботі [7] для прибережних станцій півдня Румунії, що свідчить про регіональний просторовий масштаб цього процесу. Зменшення теплосезонних опадів узгоджується також з прогнозами кліматичних моделей для Одеси на 2021–2050 рр., де передбачається формування сухого спекотного літа [13].

По-друге, встановлено значуще скорочення кількості днів з опадами ≥ 10 мм у теплий сезон (R10mm: $-0,088$ дн/рік, $p=0,012$). За 30 років це відповідає зменшенню кількості помірно інтенсивних опадових подій приблизно на 2,6 дні за сезон. Цей результат свідчить про зменшення не лише загальної суми теплосезонних опадів, а й частоти окремих значущих опадових подій. Аналогічні тенденції до зменшення частоти помірно інтенсивних опадів у літній період характерні для всього Середземноморського регіону та відзначаються в роботі [6] для Карпатського регіону, який також зазнає впливу зміни кліматичних режимів.

По-третє, виявлено тенденцію до збільшення тривалості сухих періодів у теплий сезон, яка є статистично незначущою при стандартному рівні $p < 0,05$, але вираженою (CDD: $+0,208$ дн/рік,

$p=0,094$). За 30 років це відповідає збільшенню тривалості найдовшого сухого епізоду у теплому сезоні приблизно на 6 днів. Подовження сухих серій у теплий сезон є одним із найбільш надійних і широко задокументованих сигналів кліматичних змін у Середземноморському та Причорноморському регіонах [6, 7, 14]. Відповідно до оцінок МГЕЗК [14], зростання тривалості посух у теплий сезон є одним із найбільш ймовірних наслідків потепління для регіонів, що межують із Середземноморським кліматичним поясом, до яких належить Північно-Західне Причорномор'я.

Важливо зазначити, що всі три виявлені значущі сигнали є взаємоузгодженими та формують єдину картину: зменшення загальної суми опадів теплому сезону відбувається за рахунок скорочення кількості помірно інтенсивних подій та одночасного подовження сухих міжопадових інтервалів. Відсутність значущих змін для Rx1day у теплий сезон ($-0,013$ мм/рік, $p=0,972$) при зменшенні PRCPTOT та R10mm може свідчити про зміни у частоті, а не інтенсивності опадових подій — тобто опади стають рідшими, але не обов'язково слабшими. Ця особливість потребує додаткового вивчення з використанням довгих рядів спостережень та верифікації за даними метеостанцій [10, 11].

Декадний просторовий аналіз дозволяє виявити не лише наявність тренду, а й його просторову еволюцію у часі - тобто визначити які саме частини регіону зазнають найбільш виражених змін та чи є ці зміни лінійними або нелінійними протягом досліджуваного періоду.

Для декадного просторового аналізу обрано шість індексів з десяти розрахованих, які репрезентують усі основні аспекти режиму опадів та забезпечують найбільш інформативну картину просторово-часових змін:

1. PRCPTOT - ключовий інтегральний індекс, що показує загальну суму опадів; демонструє найбільш виражений річний тренд ($p=0,064$)

2. Rx1day - індекс інтенсивності екстремальних подій; важливий через розходження між ERA5-Land та станційними даними

3. R10mm - індекс частоти помірно інтенсивних опадів; показує значущий тренд у теплому сезоні ($p=0,012$)

4. CDD - індекс тривалості сухих серій; демонструє тенденцію до зростання у теплому сезоні ($p=0,094$)

5. CWD - для порівняння з CDD та оцінки змін у тривалості вологих серій

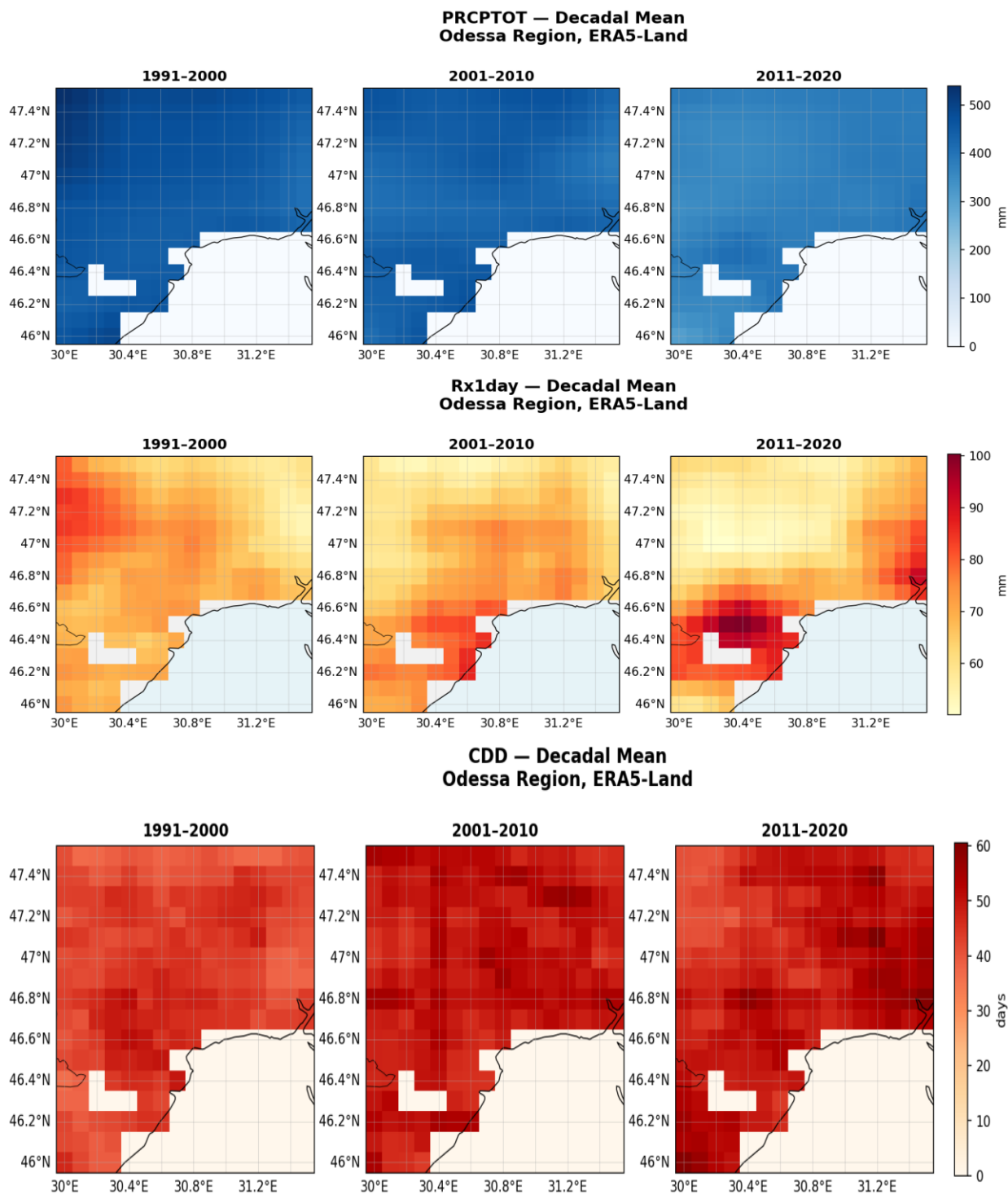
6. R95p – перцентильний індекс екстремальних опадів; характеризує зміни у частоті рідкісних подій.

Не включено: Rx5day (висока кореляція з Rx1day), SDII (низька просторова варіабельність), R20mm (мала кількість подій, нестійкі оцінки), R99p (екстремально рідкісні події, недостатньо для декадного аналізу).

Декадний аналіз просторового розподілу ше-

сти вибраних індексів ETCCDI дозволяє виявити еволюцію режиму опадів в Одеському регіоні на субперіодному рівні та оцінити просторову неоднорідність кліматичних змін у межах досліджуваного домену (рис. 4).

Декадний аналіз просторового розподілу шести вибраних індексів ETCCDI дозволяє виявити еволюцію режиму опадів в Одеському регіоні на субперіодному рівні (рис. 4).



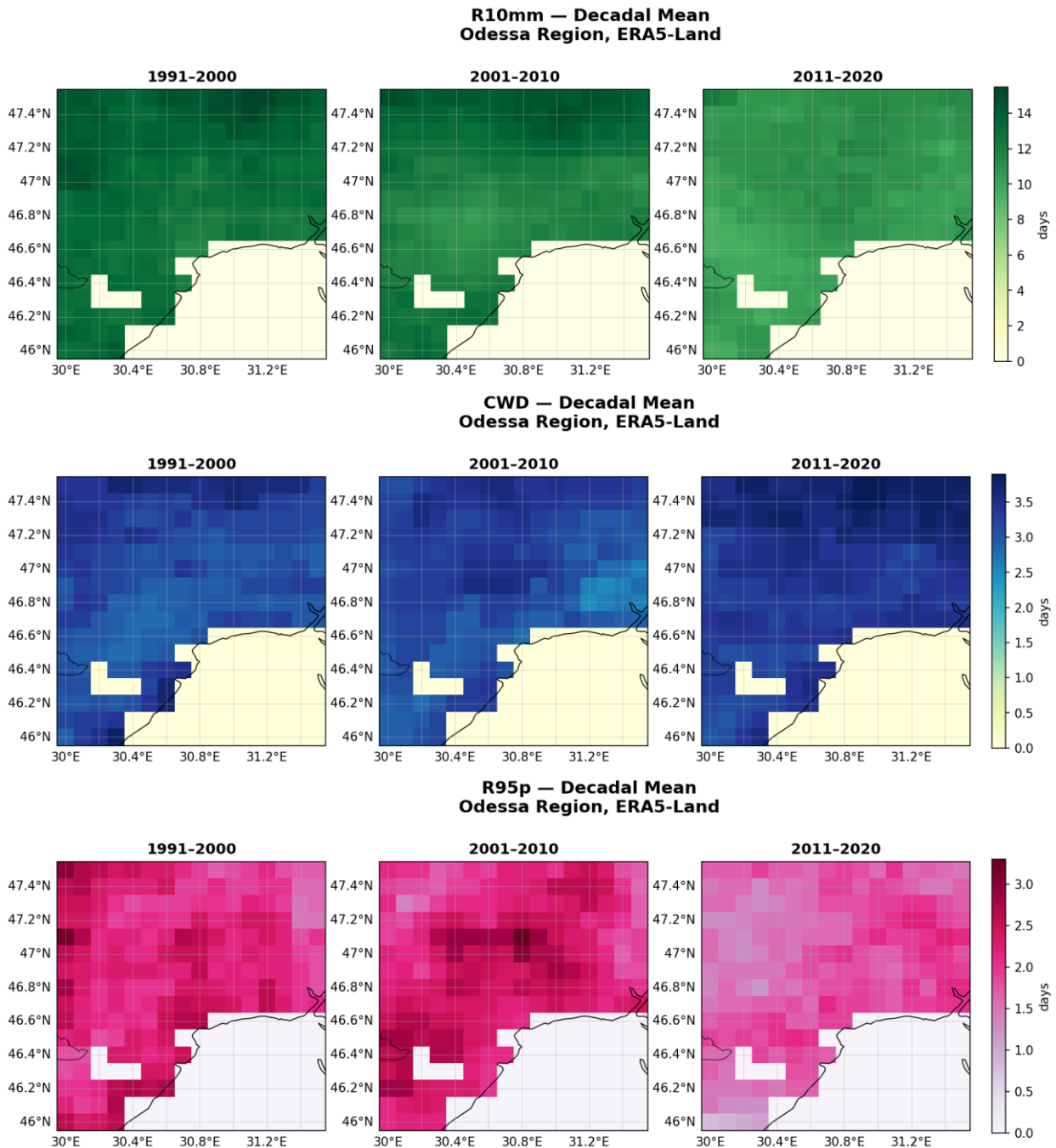


Рис. 4 – Просторовий розподіл вибраних індексів ETCCDI (PRCPTOT, Rx1day, R10mm, CDD, CWD, R95p) для Одеського регіону (ERA5-Land, 0,1°) у розрізі трьох суміжних десятиріч: 1991–2000, 2001–2010 та 2011–2020 рр.

Рисунок ілюструє поступове зменшення PRCPTOT та R10mm і збільшення CDD переважно у північній та центральній частинах регіону при відносній стабільності прибережної зони Чорного моря.

Fig. 4 – Spatial distribution of selected ETCCDI indices (PRCPTOT, Rx1day, R10mm, CDD, CWD, R95p) over the Odessa region (ERA5-Land, 0.1°) for three consecutive decades: 1991–2000, 2001–2010, and 2011–2020.

The figure illustrates a progressive decrease in PRCPTOT and R10mm and an increase in CDD predominantly in the northern and central parts of the region, with relative stability in the Black Sea coastal zone.

Індекси накопичення та частоти опадів (PRCPTOT, R10mm) демонструють узгоджену картину прогресуючого зменшення від першого (1991–2000) до третього (2011–2020) десятиріччя на більшій частині регіону. Просторова однорідність цього сигналу свідчить про регіональний, а

не локальний характер процесу, з найбільш вираженим зменшенням у північній та центральній частинах домену і відносною стабільністю прибережної зони. Ця просторова структура узгоджується з результатами роботи [7], де для суміжних районів Румунії також виявлено більш

виражене зменшення опадів у континентальній частині порівняно з прибережною зоною.

Індекс максимальних добових опадів (Rx1day) характеризується найбільшою просторовою неоднорідністю та міждекадною мінливістю. Характерною рисою є зміщення зони підвищених значень від північної частини домену у першому десятиріччі до прибережної смуги у третьому, що може бути пов'язане з посиленням конвективних процесів над прибережною зоною Чорного моря в умовах підвищення температури поверхні моря [8, 14].

Кількість днів з опадами ≥ 10 мм демонструє стійке просторово рівномірне зменшення від першого до третього десятиріччя практично на всій території регіону. Просторова однорідність цього сигналу свідчить про те що зменшення частоти помірно інтенсивних опадів є регіональним процесом, а не локальним явищем, що підтверджується значущим від'ємним трендом у теплому сезоні.

Індекс тривалості сухих серій (CDD) демонструє поступове збільшення переважно у північно-східній частині регіону при відносній стабільності прибережної зони, що може свідчити про зростаючий вплив морської складової на зволоження прибережної смуги [13, 14].

Максимальна тривалість вологих серій (CWD) залишається стабільно низькою протягом усього періоду дослідження без чітко вираженої міждекадної тенденції, що узгоджується з відсутністю значущого річного тренду для цього індексу.

Для R95p спостерігається зменшення у більшості комірок регіону з найбільш вираженим сигналом у центральній частині домену, тоді як окремі прибережні комірки у третьому десятиріччі демонструють протилежну тенденцію, що може свідчити про зростання інтенсивності окремих екстремальних подій на тлі загального зменшення їхньої частоти [8].

Загалом декадний аналіз підтверджує та просторово деталізує висновки річного та сезонного трендового аналізу: найбільш виражені ознаки посушливості охоплюють північну та центральну частини регіону, тоді як прибережна зона Чорного моря характеризується меншою міждекадною мінливістю більшості індексів через вплив моря.

Просторовий аналіз трендів методом Манна-Кендалла для кожної суходільної комірки сітки ERA5-Land (рис. 5) дозволяє виявити внутрішньорегіональну неоднорідність кліматичного сигналу та визначити зони з найбільш вираженими змінами режиму опадів в Одеському регіо-

ні за 1991–2020 рр. Просторова візуалізація трендів із розрізненням за знаком та статистичною значущістю ($p < 0,1$) є стандартним підходом у регіональній кліматології [5, 6] та дозволяє отримати більш детальну картину порівняно з регіонально усередненими рядами.

Для просторового трендового аналізу обрано чотири індекси, що репрезентують ключові аспекти режиму опадів: PRCPTOT як інтегральний показник річної суми опадів з найбільш вираженим регіональним трендом ($p = 0,064$); Rx1day як індикатор інтенсивності екстремальних подій, що демонструє принципове розходження між ERA5-Land та станційними даними; R10mm як показник частоти помірно інтенсивних опадів зі значущим трендом у теплому сезоні ($p = 0,012$); та CDD як індикатор тривалості сухих серій з вираженою тенденцією до зростання ($p = 0,094$). Разом ці чотири індекси охоплюють три незалежні виміри режиму опадів — кількість, частоту та тривалість сухих серій — і є найбільш інформативними з точки зору виявлених кліматичних змін у регіоні.

Просторовий розподіл трендів річної суми опадів характеризується найбільш однорідним та статистично значущим від'ємним сигналом серед усіх аналізованих індексів. Значущий від'ємний тренд (темно-синій) охоплює переважну більшість суходільних комірок домену, з максимальним від'ємним нахилом Сена у північній та центральній частинах регіону ($-4,0$ до $-5,5$ мм/рік). Прибережна зона та окремі комірки у південно-західній частині домену демонструють незначущий від'ємний тренд (блакитний). Просторова однорідність сигналу для PRCPTOT свідчить про те що зменшення річної суми опадів є регіональним процесом, характерним для всього Північно-Західного Причорномор'я, а не локальним явищем. Аналогічна просторова структура з переважанням від'ємних трендів PRCPTOT виявлена у роботі [7] для суміжного регіону півдня Румунії.

Просторовий розподіл трендів максимальних добових опадів є найбільш неоднорідним серед аналізованих індексів та демонструє виражену просторову диференціацію. Значущий від'ємний тренд переважає у північній частині домену (нахил Сена $-0,4$ до $-0,6$ мм/рік), тоді як у прибережній зоні та в окремих південних комірках спостерігаються незначущі позитивні або нейтральні тренди. Ця просторова структура є методологічно важливою у контексті верифікації: метеостанція Одеса, розташована у прибережній зоні, фіксує значущий зростаючий тренд Rx1day ($+0,90$ мм/рік, $p = 0,010$), що узгоджується з прос-

торовою картою — прибережні комірки ERA5-Land також демонструють менш виражений від'ємний або нейтральний тренд порівняно з північною частиною регіону. Посилення інтенсивнос-

ті екстремальних опадів у прибережній зоні може бути пов'язане з підвищенням температури поверхні Чорного моря та зростанням конвективної нестабільності [8, 14].

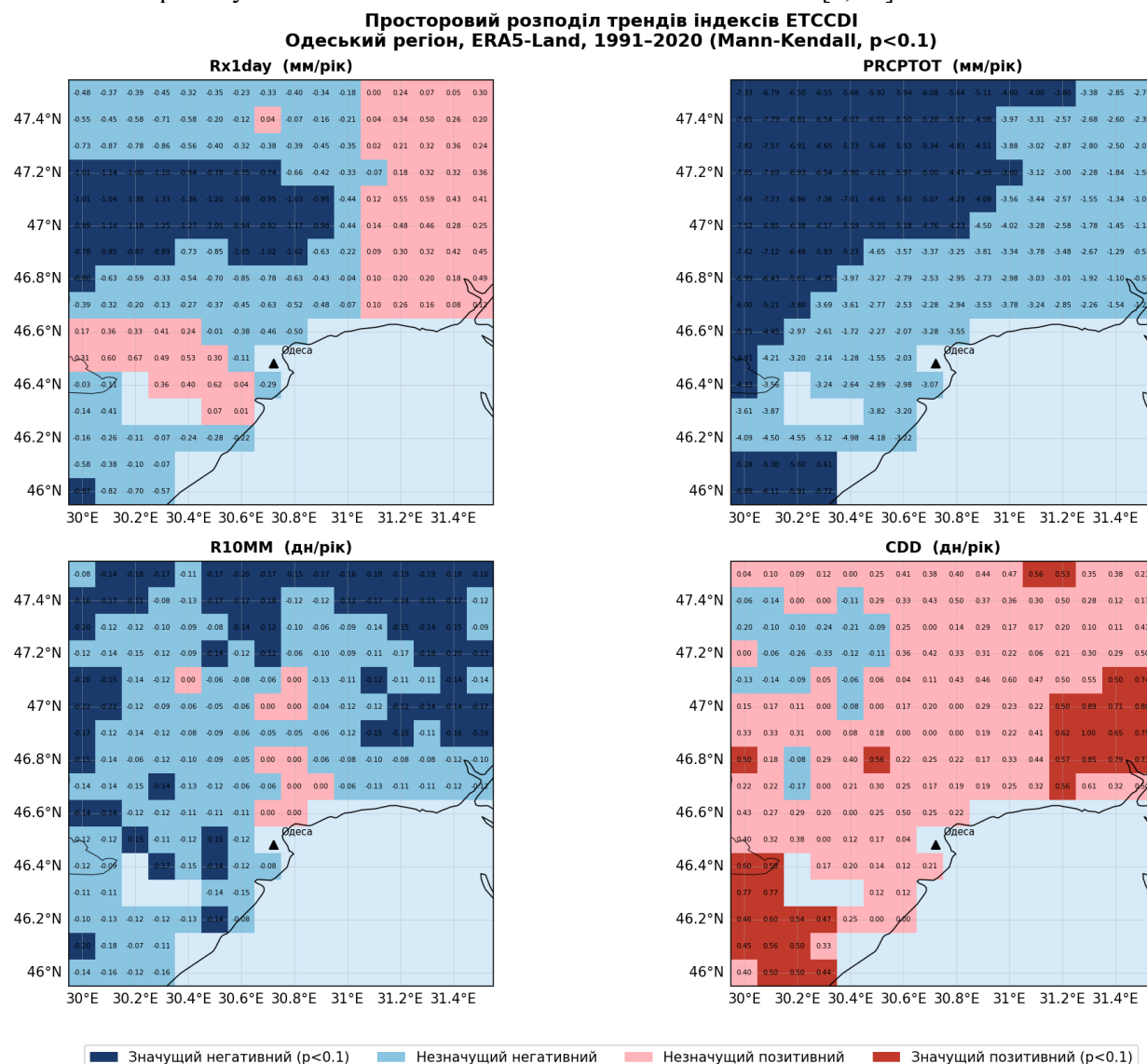


Рис. 5 – Просторовий розподіл трендів Sen's slope індексів ETCCDI за даними ERA5-Land (1991–2020).

Колір відображає знак та статистичну значущість тренду (критерій Манна-Кендалла, $p < 0.1$). Цифри на комірках — величина тренду (мм/рік або дн/рік). Трикутником позначено положення метеостанції Одеса-обсерваторія. Значущий від'ємний тренд PRCPTOT та R10mm охоплює більшість суходільних комірок домену; для CDD виражений позитивний тренд зосереджений у північно-східній частині регіону, тоді як прибережна зона демонструє нейтральні або незначущі значення.

Fig. 5 – Spatial distribution of Sen's slope for selected ETCCDI indices derived from ERA5-Land (1991–2020). Colours indicate the sign and statistical significance of the trend (Mann-Kendall test, $p < 0.1$). Values shown in each grid cell represent the trend magnitude (mm/yr or days/yr). The triangle marks the location of the Odessa meteorological station. Significant negative trends in PRCPTOT and R10mm cover most of the land grid cells; for CDD, a pronounced positive trend is concentrated in the north-eastern part of the region, while the coastal zone shows neutral or insignificant values.

Просторовий розподіл трендів кількості днів з опадами ≥ 10 мм характеризується переважанням значущого від'ємного сигналу у північній та центральній частинах домену. Нахил Сена становить -0.10 до -0.15 дн/рік для більшості комірок з значущим трендом. Прибережна зона та окремі комірки у південно-східній частині регіо-

ну демонструють незначущі тренди близькі до нуля. Просторова структура R10mm є близькою до PRCPTOT, що свідчить про те, що зменшення річної суми опадів відбувається переважно за рахунок скорочення кількості помірно інтенсивних подій, а не зміни їхньої середньої інтенсивності. Цей висновок узгоджується з відсутністю

значущого тренду для SDII на регіональному рівні.

Просторовий розподіл трендів тривалості сухих серій є найбільш неоднорідним серед усіх аналізованих індексів та демонструє чітку просторову диференціацію між внутрішніми та прибережними районами. Значущий позитивний тренд (червоний) зосереджений у північно-східній частині домену з нахилом Сена +0,3 до +0,5 дн/рік, тоді як незначущий позитивний тренд (рожевий) охоплює центральну частину регіону. Прибережна зона Чорного моря демонструє незначущі від'ємні або нейтральні значення, що може свідчити про модифікуючий вплив морської поверхні на тривалість сухих серій у прибережній смузі. Подібна просторова диференціація трендів CDD між прибережними та континентальними районами відзначається і в роботі [6] для Карпатського регіону, де морська та гірська складові суттєво модифікують регіональний кліматичний сигнал. Зростання тривалості сухих серій у внутрішніх районах Одеського регіону узгоджується з прогнозованим збільшенням частоти та тривалості посух для півдня України за сценаріями глобального потепління [13, 14].

Загалом просторовий аналіз трендів виявляє виражену внутрішньорегіональну диференціацію кліматичного сигналу в Одеському регіоні. Спільною рисою для більшості індексів є послаблення від'ємного сигналу або навіть його зміна на позитивний у прибережній зоні Чорного моря порівняно з внутрішніми районами. Це свідчить про важливу роль морської поверхні у формуванні регіональних особливостей змін режиму опадів у Північно-Західному Причорномор'ї та підкреслює необхідність просторово деталізованих досліджень для коректної оцінки регіональних кліматичних ризиків [8, 13, 14].

Верифікація індексів ETCCDI, розрахованих за даними реаналізу ERA5-Land, здійснена шляхом їх порівняння з відповідними індексами метеостанції Одеса (ODESA_OBSERV, STAD: 400) з бази ECA&D за спільний період 1991–2020 рр. Порівняння проводилось між даними метеостанції Одеса та найближчою суходільною коміркою ERA5-Land (46,4°N, 30,7°E, відстань 9,3 км від центру міста), оскільки комірки над акваторією Чорного моря та лиманів не містять даних у продукті ERA5-Land. Слід зазначити що просторове зміщення між точками порівняння, а також різниця в характері підстильної поверхні – безпосередня близькість метеостанції до акваторії моря та лиманів порівняно з суходільною коміркою реаналізу — можуть частково обумов-

лювати виявлені розбіжності, зокрема для індексів інтенсивних опадів RX1DAY та SDII [11, 18, 19]. Результати верифікації наведено у табл. 3 та на рис. 6.

Індекси накопичених опадів. ERA5-Land задовільно відтворює міжрічну мінливість річної суми опадів у дощові дні: для PRCPTOT кореляція з даними станції становить $R=0,45$ ($p=0,012$), що є статистично значущим результатом для 30-річного ряду. Зміщення (Bias) для PRCPTOT є відносно невеликим (–15,1 мм або –3,4%), що свідчить про задовільну відтворюваність середнього рівня річних опадів реаналізом. RMSE становить 132,7 мм, що відображає значну міжрічну мінливість опадів у регіоні, яку реаналіз не завжди відтворює синхронно зі станційними даними. Для R10mm кореляція є найвищою серед усіх верифікованих індексів — $R=0,51$ ($p=0,004$), що свідчить про задовільне відтворення ERA5-Land міжрічної мінливості частоти помірно інтенсивних опадів. Зміщення для R10mm становить –1,8 дн/рік (–13,4%), тобто ERA5-Land дещо занижує кількість днів з опадами ≥ 10 мм порівняно зі станцією, що є типовою характеристикою сіткових продуктів реаналізу внаслідок просторового усереднення в межах комірки [18, 19].

Індекси інтенсивності. Для RX1DAY виявлено принципове розходження між реаналізом та станційними даними як за абсолютними значеннями, так і за характером міжрічної мінливості. ERA5-Land систематично завищує максимальні добові опади (Bias = +35,5 мм або +79%), при цьому кореляція між рядами є від'ємною ($R=-0,301$, $p=0,106$). Це означає що роки з екстремально високими добовими опадами за даними станції не збігаються з роками максимальних значень ERA5-Land. Таке розходження є відомою характеристикою реаналізів при відтворенні точкових екстремумів опадів — просторове усереднення в межах комірки $0,1^\circ$ призводить до перерозподілу інтенсивних конвективних подій у часі та просторі [18, 19]. Для SDII ERA5-Land також систематично завищує середню інтенсивність опадів у дощові дні (Bias = +3,1 мм/день або +44%), а кореляція є практично нульовою ($R=0,043$, $p=0,821$), що підтверджує відому обмеженість реаналізів у відтворенні точкових характеристик інтенсивності опадів [11, 18].

Індекс тривалості сухих серій. Для CDD кореляція між ERA5-Land та станційними даними є слабкою ($R=0,108$, $p=0,568$), а зміщення становить +11,9 дн/рік (+33%), тобто реаналіз систематично переоцінює тривалість сухих серій порівняно зі станцією. Це може бути пов'язане як з

різницею у підстильній поверхні (суходіл vs. прибережна зона), так і з особливостями відтворення ERA5-Land дрібних опадових подій (<1 мм), які фіксуються станцією але можуть не відтворюватись реаналізом у конкретній комірці [19].

Порівняння трендів ERA5-Land та станційних даних. Порівняння трендів Sen's slope між ERA5-Land та метеостанцією Одеса (рис. 6) виявило узгодженість напрямку тренду лише для R10mm та CDD — обидва набори даних показують від'

ємну тенденцію для R10mm та позитивну для CDD, хоча величини трендів суттєво різняться. Для PRCPTOT та SDII тренди розходяться за знаком: ERA5-Land показує від'ємну тенденцію, тоді як станційні дані — позитивну, хоча обидва тренди є статистично незначущими. Найбільш принциповим є розходження для RX1DAY: станція фіксує значущий зростаючий тренд (+0,90 мм/рік, $p=0,010$), тоді як ERA5-Land демонструє незначущий від'ємний тренд (−0,29 мм/рік, $p=0,721$).

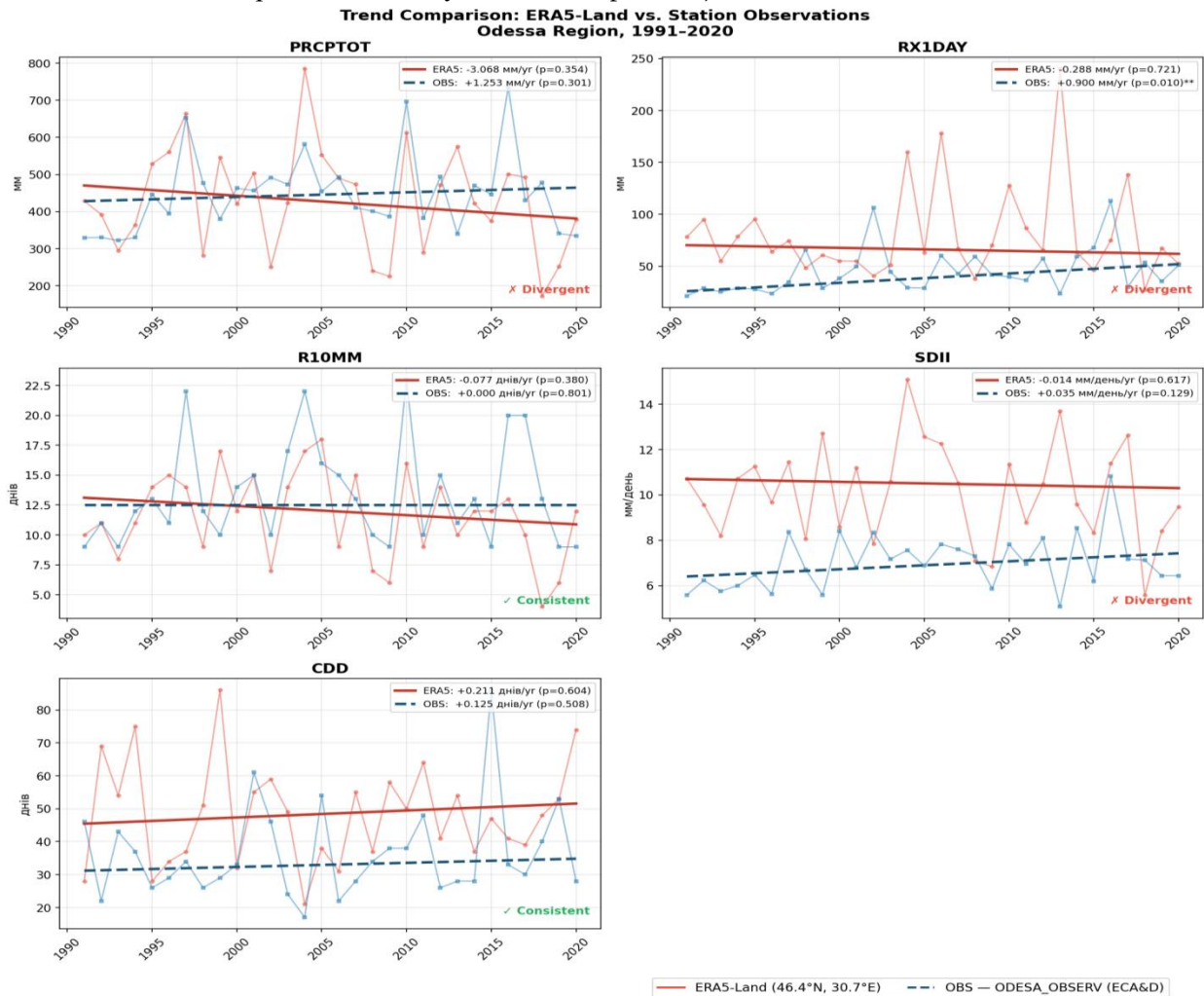


Рис. 6 – Тренди за методом Сена для вибраних індексів ETCCDI, розрахованих за даними ERA5-Land (червона суцільна лінія) та спостереженнями метеостанції ODESA_OBSERV, ECA&D (синя пунктирна лінія) за 1991–2020 рр.

Нахил Сена та р-значення наведено у легенді. Позначки (✓/✗) відображають узгодженість напрямку тренду між двома наборами даних. Принципове розходження знаків тренду RX1DAY — зростаючий значущий тренд за даними станції (+0,90 мм/рік, $p=0,010$) при незначущому від'ємному тренді ERA5-Land — є одним із ключових результатів роботи і свідчить про обмеження реаналізу у відтворенні точкових екстремумів опадів у прибережній зоні.

Fig. 6 – Mann-Kendall trend lines for selected ETCCDI indices derived from ERA5-Land (red solid) and station observations at ODESA_OBSERV, ECA&D (blue dashed) for 1991–2020. Sen's slope and p-values are shown in the legend.

Trend consistency (✓/✗) indicates agreement in trend direction between the two datasets.

The opposing trend signs for RX1DAY — a significant increasing trend at the station (+0.90 mm/yr, $p=0.010$) versus an insignificant negative trend in ERA5-Land — represent one of the key findings of this study, indicating limitations of the reanalysis in capturing point-scale precipitation extremes in the coastal zone.

Таблиця 3 – Верифікація індексів ETCCDI: ERA5-Land vs. метеостанція Одеса (ECA&D), 1991–2020
Table 3 – Validation of ETCCDI indices: ERA5-Land vs. Odessa meteorological station (ECA&D), 1991–2020

Індекс / Index	ERA5-Land	OBS (ECA&D)	Bias	RMSE	R	p
PRCPTOT, мм / mm	432,5	447,5	–15,1	132,7	0,451	0,012
RX1DAY, мм / mm	80,6	45,1	+35,5	66,2	–0,301	0,106
R10MM, дн / days	11,6	13,4	–1,8	4,3	0,509	0,004
SDII, мм/день / mm/day	10,2	7,0	+3,1	3,9	0,043	0,821
CDD, дн / days	48,2	36,2	+11,9	22,8	0,108	0,568

Примітка: Bias = ERA5-Land – OBS; R — коефіцієнт кореляції Пірсона;

p — рівень значущості кореляції; RMSE — середньоквадратична похибка.

Note: Bias = ERA5-Land – OBS; R — Pearson correlation coefficient;

p — significance level of correlation; RMSE — root mean square error.

Цей результат є важливим методологічним висновком: ERA5-Land не відтворює спостережуваного посилення максимальних добових опадів у прибережній зоні Одеського регіону, що підтверджується і просторовим аналізом трендів (розд. 4.5), де прибережні комірки демонструють менш виражений від'ємний або нейтральний тренд Rx1day порівняно з внутрішніми районами. Аналогічні обмеження ERA5 та ERA5-Land у відтворенні трендів екстремальних опадів для окремих станцій відзначаються і в роботах [10, 11, 18, 19].

Загалом верифікація показує що ERA5-Land є задовільним інструментом для аналізу просторово усереднених характеристик режиму опадів та їх міжрічної мінливості в Одеському регіоні, зокрема для індексів накопичених опадів (PRCPTOT, R10mm). Водночас реаналіз має суттєві обмеження у відтворенні точкових характеристик інтенсивних та екстремальних опадів (RX1DAY, SDII), що необхідно враховувати при інтерпретації результатів просторового трендового аналізу для цих індексів.

5. ВИСНОВКИ

1. Кліматологічні характеристики індексів ETCCDI для Одеського регіону за 1991–2020 рр. відповідають напівпосушливому перехідному клімату Північно-Західного Причорномор'я, а їх просторовий розподіл характеризується неоднорідністю з підвищеними значеннями опадових індексів у прибережній зоні та зростанням CDD у північному та східному напрямках.

2. Річний трендовий аналіз виявив статистично незначущу при стандартному рівні $p < 0,05$, але виражену тенденцію до зменшення річної суми опадів (PRCPTOT: $-3,48$ мм/рік, $p = 0,064$). Решта індексів демонструє від'ємні тенденції без досягнення статистичної значущості, що пояснюється відносно коротким 30-річним рядом і значною міжрічною мінливістю опадів у регіоні.

3. Сезонна декомпозиція трендів виявила принципову асиметрію між холодним та теплим

сезонами: у холодний сезон (листопад–березень) значущих трендів не виявлено, тоді як у теплому сезоні (квітень–жовтень) зафіксовано три статистично значущих або близьких до значущих сигнали - зменшення PRCPTOT ($-2,60$ мм/рік, $p = 0,032$), скорочення R10mm ($-0,088$ дн/рік, $p = 0,012$) та збільшення CDD ($+0,208$ дн/рік, $p = 0,094$), що може вказувати на розширення субтропічного сухого поясу над Причорноморським регіоном.

4. Декадний просторовий аналіз підтвердив прогресуюче зменшення PRCPTOT та R10mm від першого (1991–2000) до третього (2011–2020) десятиріччя на більшій частині регіону, з найбільш вираженим сигналом у північній та центральній частинах домену. Прибережна зона Чорного моря характеризується меншою міждекадною мінливістю більшості індексів, що свідчить про модифікуючий вплив морської поверхні на режим опадів у прибережній смузі.

5. Просторовий аналіз трендів методом Манна-Кендалла виявив виражену внутрішньорегіональну диференціацію кліматичного сигналу. Значущий від'ємний тренд PRCPTOT охоплює більшість суходільних комірок домену, тоді як для CDD виявлено значущий позитивний тренд у північно-східній частині регіону. Для Rx1day просторовий розподіл трендів неоднорідний — значущий від'ємний сигнал переважає у північній частині, тоді як прибережна зона демонструє нейтральні або незначущі тренди.

6. Верифікація за даними ECA&D показала задовільну узгодженість ERA5-Land з наземними спостереженнями для індексів накопичених опадів (PRCPTOT: $R = 0,45$, $p = 0,012$; R10MM: $R = 0,51$, $p = 0,004$) при незначному від'ємному зміщенні (Bias = $-15,1$ мм та $-1,8$ дн відповідно). Для індексів інтенсивності (RX1DAY, SDII) та тривалості сухих серій (CDD) виявлено слабку або від'ємну кореляцію та систематичне завищення значень ERA5-Land, що є типовою характеристикою сіткових продуктів реаналізу при

відтворенні точкових екстремумів опадів.

7. Задовільна узгодженість між ERA5-Land та станційними спостереженнями встановлена лише для індексів накопичених опадів (PRCPTOT: $R=0,45$, $p=0,012$; R10MM: $R=0,51$, $p=0,004$), що дозволяє розглядати відповідні тренди ERA5-Land як методологічно обґрунтовані для регіонального аналізу. Для індексів RX1DAY, SDII та CDD слабка або від'ємна кореляція між рядами унеможливорює коректне порівняння трендів. Зростаючий тренд RX1DAY за даними метеостанції Одеса (+0,90 мм/рік, $p=0,010$) слід розглядати як самостійний результат наземних спостережень, що вказує на посилення максимальних добових опадів у прибережній зоні, однак не може бути верифікований реаналізом ERA5-Land через принципову неузгодженість рядів для цього індексу.

8. Отримані результати в цілому можуть свідчити про прогресуюче зменшення кількості та частоти опадів у теплий сезон при одночасному збільшенні тривалості сухих серій в Північно-Західному Причорномор'ї протягом 1991–2020 рр., і встановлено вперше на основі ERA5-Land за кліматичну норму 1991–2020 для цього регіону. Виявлені тренди мають практичне значення для оцінювання водних ресурсів, агрокліматичних умов та планування адаптаційних заходів у Північно-Західному Причорномор'ї.

ПОДЯКИ

Автор висловлює подяку рецензентам та редакційній колегії Журналу за критичні зауваження до тексту. Дослідження виконано за підтримки проекту «Сталий розвиток управління і моделювання водних ресурсів Північно-Західного Причорномор'я в умовах зростання екстремальності клімату та антропогенного навантаження» (ДР № 0126U001796, 2026–2028 рр.). Дані реаналізу ERA5-Land отримано через Copernicus Climate Data Store (CDS) в рамках Copernicus Climate Change Service (C3S), що реалізується ЕСМВФ від імені Європейської Комісії. Дані індексів екстремальних опадів для станції Одеса отримано з бази European Climate Assessment & Dataset (ECA&D).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. World Meteorological Organization (2025): State of the Climate in Europe 2024. WMO, Geneva. <https://library.wmo.int/records/item/69475-state-of-the-climate-in-europe-2024> (Дата звернення: 20.05.2026).
2. Ukraine's Climate Change Adaptation Communication to UNFCCC, 27 May 2024. <https://unfccc.int/sites/default/files/2025-05/Ukraine%201st%20Adaptation%20Communication.pdf> (Дата звернення:

20.05.2026).

3. Ovcharuk, V. and Khomenko, I.: Flash Flood Events in the Northwestern Black Sea Region under Climate Change, *EGU General Assembly 2026*, Vienna, Austria, 3–8 May 2026, EGU26-14233. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-14233>
4. Zhang, X., et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, 2, 851–870, 2011. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
5. Klein Tank, A. M. G., Können, G. P. Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99. *Journal of Climate*, 16, 3665–3680, 2003. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3665:TIHOTD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIHOTD>2.0.CO;2)
6. Micu, D.M., Amihaesei, V.A., Milian, N. et al. Recent changes in temperature and precipitation indices in the Southern Carpathians, Romania (1961–2018). *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 691–710, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03560-w>
7. Ionita, M. et al. On the Examination of the Relationship between Mean and Extreme Precipitation and Circulation Types over Southern Romania. *Atmosphere*, 14(9), 1345, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14091345>
8. Agayar, E., Aemisegger, F., Armon, M., Scherrmann, A., Wernli, H. Precipitation extremes in Ukraine from 1979 to 2019: climatology, large-scale flow conditions, and moisture sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 2441–2459, 2024. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-2441-2024>
9. Agayar, E. Precipitation extremes in the Ukraine: dynamical aspects, large-scale circulation and moisture sources. *EGU General Assembly 2023*, Vienna, Austria, 24–28 April 2023, EGU23-2647. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2647>
10. Семергей-Чумаченко А. Б., Слободяник К. Л. Просторово-часовий розподіл сильних опадів над Україною протягом 1979–2019 рр. за даними реаналізу ERA5. *Український гідрометеорологічний журнал*, 2020, № 26, С. 50–59. <https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.04>
11. Слободяник К. Л., Семергей-Чумаченко А. Б., Веретнова В. О. Виникнення сильних опадів на станції Херсон за даними реаналізу ERA5 та метеорологічних спостережень. *World Science*, No 11 (72), 2021. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30122021/7720
12. Прокоф'єв О. М., Гончарова Л. Д. Оцінка весняних регіональних відгуків термічного режиму Північно-Західного Причорномор'я на зміну глобального клімату. *Український гідрометеорологічний журнал*, 2025. № 34-35. С. 5-17. <https://uhmj.org.ua/index.php/journal/article/view/234>
13. Borovska, H., Khokhlov, V. Climate data for Odesa, Ukraine in 2021–2050 based on EURO-CORDEX simulations. *Geoscience Data Journal*, 2024. <https://doi.org/10.1002/gdj3.197>
14. IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
15. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049, 2020. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
16. Muñoz Sabater, J. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac> (Дата звернення: 20.05.2026).
17. Muñoz Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383,

2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

18. Diaz, D. et al. Evaluating the ability of gridded climate datasets to capture temperature and precipitation trends and extremes. *Scientific Reports*, 15, 12607, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97570-7>

19. de Gois, G. et al. Satellite–Reanalysis Contrasts in Extreme Rainfall around the Itaipu Reservoir, Brazil. *Earth Systems and Environment*, 2026. <https://doi.org/10.1007/s41748-026-01238-9>

REFERENCES

1. World Meteorological Organization (2025): State of the Climate in Europe 2024. WMO, Geneva. <https://library.wmo.int/records/item/69475-state-of-the-climate-in-europe-2024> (Accessed on 20-May-2026).

7. Ukraine's Climate Change Adaptation Communication to UNFCCC, 27 May 2024. <https://unfccc.int/sites/default/files/2025-05/Ukraine%201st%20Adaptation%20Communication.pdf> (Accessed on 26-May-2026).

8. Ovcharuk, V. and Khomenko, I.: Flash Flood Events in the Northwestern Black Sea Region under Climate Change, *EGU General Assembly* 2026, Vienna, Austria, 3–8 May 2026, EGU26-14233. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-14233>

9. Zhang, X., et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, 2, 851–870, 2011. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>

10. Klein Tank, A. M. G., and Können, G. P. Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99. *Journal of Climate*, 16, 3665–3680, 2003. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3665:TIIODT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIIODT>2.0.CO;2)

11. Micu, D.M., Amihaesei, V.A., Milian, N. et al. Recent changes in temperature and precipitation indices in the Southern Carpathians, Romania (1961–2018). *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 691–710, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03560-w>

12. Ionita, M. et al. On the Examination of the Relationship between Mean and Extreme Precipitation and Circulation Types over Southern Romania. *Atmosphere*, 14(9), 1345, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14091345>

13. Agayar, E., Aemisegger, F., Armon, M., Scherrmann, A., Wernli, H. Precipitation extremes in Ukraine from 1979 to 2019: climatology, large-scale flow conditions, and moisture sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 2441–2459, 2024. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-2441-2024>

14. Agayar, E. Precipitation extremes in the Ukraine: dynamical aspects, large-scale circulation and moisture sources.

EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 April 2023, EGU23-2647. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2647>

15. Semerhei-Chumachenko, A. B., & Slobodanyk, K. L. Spatial–temporal distribution of heavy precipitation over Ukraine during 1979–2019 according to the ERA5 reanalysis. *Ukrainian hydrometeorological journal*, (26), 50–59, 2020. <https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.04> [in Ukrainian].

16. Slobodanyk, K. L., Semerhei-Chumachenko, A. B., Veretnova, V. O. Occurrence of heavy precipitation at Kherson station according to ERA5 reanalysis and meteorological observations. *World Science*, No 11 (72), 2021. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30122021/7720 [in Ukrainian].

17. Prokofiev, O.M., Goncharova, L.D. Assessment of spring regional responses of the thermal regime of the Northwestern Black Sea region to global climate change. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 2025. <https://uhmj.org.ua/index.php/journal/article/view/234> [in Ukrainian].

18. Borovska, H., Khokhlov, V. Climate data for Odesa, Ukraine in 2021–2050 based on EURO-CORDEX simulations. *Geoscience Data Journal*, 2024. <https://doi.org/10.1002/gdj3.197>

19. IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

20. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049, 2020. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

21. Muñoz Sabater, J. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac> (Accessed on 20-May-2026).

22. Muñoz Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

23. Diaz, D. et al. Evaluating the ability of gridded climate datasets to capture temperature and precipitation trends and extremes. *Scientific Reports*, 15, 12607, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97570-7>

24. de Gois, G. et al. Satellite–Reanalysis Contrasts in Extreme Rainfall around the Itaipu Reservoir, Brazil. *Earth Systems and Environment*, 2026. <https://doi.org/10.1007/s41748-026-01238-9>

ETCCDI INDICES IN THE ODESSA REGION BASED ON ERA5-LAND REANALYSIS AND STATION OBSERVATIONS: TRENDS AND VALIDATION FOR 1991–2020

A. B. Semerhei-Chumachenko

Odesa I. I. Mechnikov National University,

2 V. Zmiiienka Str., 65082, Odesa, Ukraine, alina.semerhei-chumachenko@onu.edu.ua,

<https://orcid.org/0000-0001-8718-4073>

Changes in the precipitation extremes regime in the North-Western Black Sea region are investigated based on ten ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) indices derived from the ERA5-Land reanalysis (spatial resolution $0,1^\circ$) for the standard climate normal period 1991–2020. Temporal trends are assessed using the non-parametric Mann-Kendall test with trend magnitude estimated by Sen's slope estimator. Spatial analysis is performed for the ERA5-Land grid within the domain $46,0\text{--}47,5^\circ\text{N}$, $30,0\text{--}31,5^\circ\text{E}$; seasonal analysis is conducted separately for the cold (November–March) and warm (April–October) seasons. Validation of the reanalysis results is carried out by comparison with observational data from the Odessa meteorological station (ECA&D, STAID: 400) for the same period.

Annual trend analysis reveals a statistically insignificant at the standard level of $p < 0,05$, but pronounced decreasing tendency in total wet-day precipitation (PRCPTOT: $-3,48\text{ mm/yr}$, $p = 0,064$). Seasonal trend decomposition demonstrates that all statistically significant trends are confined to the warm season: a decrease in PRCPTOT ($-2,60\text{ mm/yr}$, $p = 0,032$), a reduction in the frequency of days with precipitation $\geq 10\text{ mm}$ (R10MM: $-0,088\text{ days/yr}$, $p = 0,012$), and a statistically insignificant at $p < 0,05$, but pronounced increase in the length of dry spells (CDD: $+0,208\text{ days/yr}$, $p = 0,094$). No significant trends are detected during the cold season. Spatial trend analysis using the Mann-Kendall test reveals the predominance of significant negative signals for PRCPTOT and R10MM across most of the study domain, with the most pronounced decrease in the northern and central parts of the domain. The spatial distribution of CDD trends is characterised by heterogeneity: significant positive trends are recorded in the eastern part of the region, while the coastal zone exhibits insignificant negative or neutral values, potentially indicating a modifying influence of the Black Sea. For RX1DAY, spatial analysis reveals significant negative trends in the northern part of the region, which contrasts with the increasing trend recorded at the Odessa meteorological station ($+0,90\text{ mm/yr}$, $p = 0,010$), indicating limitations of the reanalysis in capturing point-scale precipitation extremes. Validation against ECA&D data reveals satisfactory agreement for accumulated precipitation indices (PRCPTOT: $R = 0,45$, $p = 0,012$; R10MM: $R = 0,51$, $p = 0,004$).

The results may indicate increasing warm-season dryness in the North-Western Black Sea region during 1991–2020, consistent with regional tendencies of summer precipitation decline characteristic of the Black Sea and Mediterranean sectors. The identified trends have practical implications for water resource assessment and agroclimatic conditions in southern Ukraine.

Keywords: ERA5-Land reanalysis, ETCCDI indices, precipitation extremes, Mann-Kendall trend, Northwestern Black Sea region, climate normal 1991–2020, heavy precipitation, regional climate change.

*Подання до редакції : 20. 02. 2026
Надходження остаточної версії : 20. 04. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026*

УДК 551.326.7:551.54:551.55(261.4+268)

ЗАЛЕЖНІСТЬ МАКСИМАЛЬНОГО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ КРИГИ В ПРОТОЦІ ДЕЙВІСА І МОРІ ЛАБРАДОР З АТМОСФЕРНИМ ТИСКОМ І ШВИДКІСТЮ ПРИЗЕМНОГО ВІТРУ В ПІВНІЧНІЙ ЧАСТИНІ АТЛАНТИЧНОГО ОКЕАНУ ТА ПІВНІЧНОМУ ЛЬОДОВИТОМУ ОКЕАНІ

Е. Є. Малюга¹, Р. В. Гаврилюк²

¹ Національний університет «Одеська морська академія»,
вул. Дідріхсона, 8, 65000, Одеса, Україна,
eduard241965@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0005-0039-9837>
² Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Всеволода Змієнка, 2, 65082, Одеса, Україна,
RAISAGAVR@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0002-9129-3293>

У арктичному регіоні впродовж останніх десятиріч відбуваються безпрецедентні кліматичні зміни і температура повітря зростає сильніше, ніж в інших частинах Земної кулі. Це отримало назву «арктичне посилення». Разом із рештою наслідків, воно призвело до стрімкого зменшення крижаного покриву, в тому числі і в Північно-Західному проході, який в сучасних умовах може відігравати все більш важливу роль в судноплаванні. З огляду на глобальні тенденції розвитку морської логістики, що проявляються в скороченні вантажоперевезень Панамським каналом (внаслідок його суттєвого обміління через посуху) і Червоним морем (у зв'язку з ризиками, з огляду на військові дії) прохід розглядається як перспективний новий маршрут, який значно знижує транспортні відстані між портами Північної Америки, Європи та Східної Азії. Тому питання, що стосуються динаміки льодового режиму в Дейвісовій протоці та морі Лабрадор, де починається шлях у Тихий океан, мають велику вагу.

На танення криги впливають передусім метеорологічні умови. Серед них – такі взаємопов'язані величини, як швидкість приземного вітру та атмосферний тиск на рівні моря. Горизонтальні градієнти тиску визначають параметри повітряних потоків, які можуть зумовити притік тепла чи посилення дрейфу льоду, що сприяє його розриву й утворенню відкритої води. Відкрита вода, у свою чергу, поглинає більше сонячного випромінювання, підсилюючи локальне нагрівання й подальше танення. Саме для визначення вираженої залежності між максимальним розповсюдженням криги в протоці Дейвіса та морі Лабрадор і цими двома факторами була проведена дана робота, методологічну основу якої складає статистичний аналіз.

Відповідно до поставленої мети, були знайдені кореляційні зв'язки між приведеними до квазістаціонарного вигляду цифровим рядом аномалій поширення льоду на 15 квітня за період з 1979 по 2023 рік (отриманий в ході попередніх напрацювань авторів) і середньомісячними рядами атмосферного тиску на рівні моря та швидкості вітру на висоті 10 м. Розрахунки проводилися поступово, від 10-градусних квадратів до 0,5-градусних і в окремих точках в Північній Атлантиці, деяких частинах материків навколо неї, Гренландії, Канадській Арктиці та в невеликому районі екваторіальної зони Тихого океану. За результатами обчислень описано особливості просторово-часового розподілу коефіцієнтів кореляції, виявлені райони / точки з їх екстремальними значеннями.

Здобуті дані створюють передумови для можливості подальшого передбачення розповсюдження криги в Дейвісовій протоці та морі Лабрадор з метою пролонгації там навігаційного періоду та підвищення безпеки судноплавства в сучасних реаліях.

Ключові слова: льодовий покрив; протока Дейвіса; море Лабрадор; Північно-Західний прохід; розповсюдження криги; атмосферний тиск на рівні моря; швидкість вітру

1. ВСТУП

У спеціальній доповіді Конференції ООН по торгівлі та розвитку (UNCTAD) 2024 р. зазначалося, що ризики судноплавних маршрутів

в Червоному, Чорному морях і Суецькому каналі та аномальне падіння рівня води в Панамському каналі призвело до скорочення майже вдвічі пропускної спроможності цих основних

міжнародних морських шляхів [1]. Компанії-перевізники вимушені змінювати традиційні маршрути, що призводить до зростання протяжності і тривалості рейсів, витрати палива, шкідливих викидів у атмосферу і в кінцевому рахунку – вартості вантажоперевезень. Так, наприклад, обсяги морської торгівлі в 2024 році збільшилися на 2,2%, в той же час, як показник «тонно-міль» став практично утричі вищим – 5,9%. Це свідчить про суттєве подовження відстані. Взагалі, з 2018 по 2024 роки середня дальність переходу виросла в середньому з 4381 до 5245 миль [2].

Разом з тим, арктичний регіон нагрівається майже у чотири рази швидше, ніж Земна куля в середньому [3]. За даними NASA та National Snow and Ice Data Center (NSIDC), зимовий морський льодовий покрив Арктики в 2025 році досяг свого найнижчого рівня за 47 років супутникових спостережень. Максимальна площа криги була на 1,32 мільйона квадратних кілометрів нижчою за середній рівень, розрахований з 1981 по 2010 рік [4, 5]. Такі зміни призводять до появи цілої низки проблем, пов'язаних як з кліматом Земної кулі загалом, так і з навколишнім середовищем Арктики зокрема, але, одночасно з тим, відкривають сприятливі перспективи розширення морського трафіку в Північно-Західному проході Канадської Арктики. Беззаперечна перевага цього маршруту – значне скорочення відстані між портами, що призводить до оптимізації усіх показників переходу, тому за останні тридцять років кількість рейсів в Канадській Арктиці зросла в чотири рази [6].

Зважаючи на це, можна стверджувати, що наявність альтернативи проходженню суден через Панамський та Суецький канали у наш час має велику актуальність [7]. Відповідно, вивченню аспектів, що стосуються впливу кліматичних змін на льодовий покрив Північно-Західного проходу, приділяється достатньо уваги, бо морська крига є основною перешкодою розвитку судноплавства в цьому регіоні. Не дивлячись на велику кількість наукових праць цього напрямку, існує ще багато питань, що потребують вирішення. Так, ефективне майбутнє планування розвитку судноплавства в Канадській Арктиці повинне спиратися на достовірні довгострокові кліматичні прогнози. Однак, відсутність необхідної кількості систематичних спостережень, які важко було отримати в сурових і складних умовах; велика мінливість взаємопов'язаних природних процесів, що важко піддається обліку; низька просторова роздільна

здатність глобальних кліматичних моделей, які часто просто «не бачать» деякі протоки; виніс внаслідок посиленого танення в Північно-Західний прохід важкої багаторічної криги з Північного океану, яка, до того ж, часто створює затори у вузьких місцях, що надзвичайно важко передбачити – все це, вкупі з деякими іншими факторами, призвело до того, що останні передові кліматичні моделі СМІР6 демонструють суттєву невизначеність в прогнозуванні льодової обстановки на довгий термін, а повна теорія арктичного посилення досі не розроблена [8, 9, 10, 11].

Представлена робота є складовою частиною комплексного дослідження максимального поширення крижаного покриву в протоці Дейвіса та морі Лабрадор – звідси починається морський шлях через Північно-Західний прохід з Атлантичного океану в Тихий. На даному етапі була поставлена задача – за допомогою кореляційного аналізу виявити статистичний зв'язок між максимальним розповсюдженням льоду в окреслених акваторіях і двома величинами: атмосферним тиском на рівні моря (MSLP) і швидкістю вітру на висоті 10 м (WS) в різних частинах Північної Атлантики, Північного Льодовитого океану та прилеглих до них територій. Вона вирішувалась з метою визначити географічні райони та точки з максимальними коефіцієнтами кореляції між площею крижаного поля на 15 квітня та зазначеними показниками. В науковій літературі цей аспект розкрито недостатньо докладно. Як правило, дослідження зазначеного напрямку сфокусовано не на пошуку простих кореляцій «площа криги – атмосферний тиск / швидкість вітру», а на визначенні зв'язку площі криги з індексами великомасштабних коливань, наприклад Північно-Атлантичного / Арктичного, з посиленням циклонічної діяльності чи з орієнтацією потужних повітряних течій, або на виносі морської криги через протоку Дейвіса [12, 13, 14, 15].

2. ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

На першій стадії дослідження було отримано цифровий ряд аномалій поширення льоду в протоці Дейвіса та морі Лабрадор на 15 квітня за період з 1979 по 2023 рік. Щоб зробити його квазістаціонарним, розглядалися не самі аномалії, а їх зміни протягом року (річний приріст). Більш детально це, а також вибір дати (15 квітня), висвітлено в [16]. В межах даної роботи знаходилися кореляційні залежності між

цім рядом і середньомісячними рядами (також приведеними до квазістаціонарного вигляду) атмосферного тиску на рівні моря (MSLP) та швидкості вітру на висоті 10 м (WS), отриманими за допомогою реаналізу Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF European Reanalysis V5 (ERA5) [0.25°]) [17], що обчислювалися послідовно для 10-, 5-, 2,5-, 1- та 0,5-градусних квадратів і в окремих точках. Покроковий перехід від великих просторових масивів осереднення до дрібніших і в кінцевому рахунку до точок дозволить розділити глобальні, синоптичні та локальні чинники впливу на льодовий покрив та визначити внесок кожного з них.

Для вихідних рядів значущими на рівні 0.01 приймалися коефіцієнти кореляції (КК) 0.48 і вище [16]. Розрахунки КК проводилися за період, який включав 15 місяців – січень, лютий та березень поточного року перед п'ятнадцятим квітня, та 12 місяців попереднього року (далі у тексті перші три з них наводитимуться, як січень – березень попереднього року, скорочено – п. р.). Площа, охоплена розрахунками, була досить суттєва – вся Північна Атлантика, деякі частини материків навколо неї, Гренландія та Північний Льодовитий океан на захід від Гринвіцького меридіану, невеликий район екваторіальної зони Тихого океану – всього разом 104 десятиградусних квадрата (рис. 1). Сучасна наука все більше від вивчення ізольованих явищ переходить до розглядання клімату, як складної багатофакторної системи, з великою кількістю взаємозв'язків. Тому на арктичну кригу можуть впливати чинники, розташовані далеко від протоки Дейвіса і моря Лабрадор [18, 19, 20, 21, 22]. Включення материків до розрахункових моделей необхідне для повного охоплення масштабної структури полів приземного тиску та швидкості вітру, а також для врахування температурних контрастів між суходолом і океаном і винесення циклонів на акваторію. Це дозволить не порушувати цілісність кліматичної системи на береговій лінії, та виявити зони високих значень коефіцієнтів кореляції безпосередньо над континентами.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Розрахунки коефіцієнтів кореляції ряду річного приросту аномалій з тиском на рівні моря на 10-градусних квадратах показали, що статистично значущих КК за період, що розглядався, виявилось досить багато – 32

(табл. 1). З них 23 дорівнювали або перевищували $|0,5|$, спостерігалися в грудні, були переважно від'ємні та сконцентровані в субполярних і полярних широтах від Гринвіцького меридіану до 100° W. Лише один з них був додатним, у квадраті, що знаходився на південний захід від острова Ньюфаундленд. Максимальне значення складало $-0,563$ (тут і далі дається з точністю до тисячних, бо при округленні до сотих результатів може бути декілька) для квадрата з координатами $70 - 80^{\circ}$ N, $10 - 20^{\circ}$ W (табл. 2). У липні значущих коефіцієнтів було 5, у лютому – 2, усі додатні, до $|0,5|$, між екватором і 20° N.

На п'ятиградусних квадратах ситуація майже не змінилася. Суттєва концентрація значущих коефіцієнтів, як і раніше, в трьох областях – у полярних / субполярних широтах (від'ємні), на південний захід від острова Ньюфаундленд (додатні) і від екватора до 20° N (додатні), усього 120 (рис. 1). За період додалось два місяці з потрібним рівнем кореляції, – травень і листопад, 2 і 1 випадки відповідно, в обох значення від'ємне. Загалом, кількісно переважають (в основному за рахунок грудня) коефіцієнти, що дорівнюють, або більші $|0,5|$, – 75 проти 45, що менші за $|0,5|$ (табл. 1). Максимальне значення – в грудні, $-0,582$, для квадрата з координатами $70 - 75^{\circ}$ N, $15 - 20^{\circ}$ W (табл. 2).

На 2,5-градусній сітці змінюється тільки кількість статистично значущих коефіцієнтів кореляції, тепер їх 469, з них 330 в інтервалі від $|0,5|$ до $|0,6|$, а інші менші за $|0,5|$. У грудні їх найбільше, у субполярних / полярних широтах (від'ємні) і на південний захід від острова Ньюфаундленд (додатні). Другий за кількістю – липень, всі показники знаходяться в тропічній зоні Північної Атлантики, в східній та західній частинах, додатні, переважно в діапазоні до $|0,5|$. На третьому місці лютий, з додатними коефіцієнтами в східній частині тропіків, заповнення проміжків до та після $|0,5|$ приблизно однакові. Вклад травня і листопада в загальну картину незначний (табл. 1). Максимальне значення – $-0,596$ у грудні ($67,5 - 70^{\circ}$ N, $17,5 - 20^{\circ}$ W та $67,5 - 70^{\circ}$ N, $20 - 22,5^{\circ}$ W) (табл. 2).

На 1-градусних квадратах для приземного тиску ситуація, окрім значного збільшення кількості коефіцієнтів до 2882, не змінилася (рис. 2) і лівова їх частка (2170) спостерігалася у грудні. Вперше з'явилися 8 показників від $|0,6|$ і вище (всі у грудні), але, порівняно з аналогічними оцінками для швидкості приземного вітру, не такі великі. Максимальний з них – $-0,603$ ($69 - 70^{\circ}$ N, $19 - 20^{\circ}$ W) (табл. 2).

Через величезний об'єм розрахунків, подальші обчислення проводилися не по всій площі досліджуваного району, а там, де спостерігалися високі коефіцієнти кореляції на рівні 1 градусу. На 0,5-градусних квадратах і в точках, як і очікувалось, тільки збільшилась кількість коефіцієнтів. Тих, що дорівнюють, або вищі $|0,6|$, стало 30 та 34 відповідно (як і раніше, в грудні), але в обох випадках максимальне значення було $-0,604$, тобто, практично не зазнало змін (табл. 2).

Кількість значущих коефіцієнтів кореляції ряду річного приросту аномалій зі швидкістю вітру на висоті 10 м на 10-градусних квадратах зафіксовано значно менше, ніж з атмосферним тиском – усього 6, половина з них менше $|0,5|$. Найбільша кількість – в червні (три, усі додатні), по одному виявилось у січні попереднього року, жовтні та грудні, в ньому ж – максимальне значення $-0,542$ ($50 - 60^{\circ}\text{N}$, $30 - 40^{\circ}\text{W}$) (табл. 3, 4). Показники по досліджуваному району розподілені за період майже рівномірно від низьких широт до високих, але, за винятком січня попереднього року, переважно на сході.

На 5-градусних квадратах зміни більш вагомі. За рахунок появи шести нових місяців зі значущою кореляцією за період, вона зросла в 5 разів, до 31, найчастіше в червні (8) та грудні (9) (табл. 3). Орієнтація квадратів по району не так добре виражена, як для MSLP і зараз почала більше заповнюватися його західна частина (рис. 3). Знак коефіцієнту залежить від розташування квадрату (в цілому переважають додатні), а максимальне значення становить $0,596$ ($55 - 60^{\circ}\text{N}$, $35 - 40^{\circ}\text{W}$) (табл. 4).

З рівня 2,5 градусів коефіцієнти для приземного вітру починають якісно перевершувати відповідні значення для тиску на рівні моря. З'явилася кореляція, що в чотирьох випадках дорівнює чи перевищує $|0,6|$, хоча сумарна кількість, порівняно з MSLP, невелика, всього 118. До того ж, значущі коефіцієнти тепер спостерігаються для 13 місяців з 15, окрім квітня та липня. Першими за чисельністю коефіцієнтів є грудень (30), червень (20), січень попереднього року та жовтень (по 15) (табл. 3). Географічно за весь період вже можна виділити кілька районів з великою концентрацією значущих коефіцієнтів кореляції – Мексиканська затока, архіпелаг Кабо-Верде та на південний захід від нього, на південь і південний захід від Азорських островів, на південний захід від о. Ісландія, море Бофорта. Більша частина показників від $|0,5|$ до $|0,6|$, максимальний $-0,611$ в лютому попереднього року ($77,5 - 80^{\circ}\text{N}$, $77,5 - 80^{\circ}\text{W}$) (табл. 4).

Максимальні коефіцієнти кореляції для приземного тиску на всіх рівнях обчислень були позиціоновані в районі острова Ісландія в грудні (табл. 2, рис. 2). Шляхом загальноприйнятого округлення результатів обчислень до сотих, отримаємо: $-0,56$, $-0,58$, $-0,60$, $-0,60$, $-0,60$, $-0,60$ (від 10-градусних квадратів до точок відповідно). Стійкий негативний зв'язок свідчить, що падіння тиску, тобто поглиблення Ісландського мінімуму, посилює холодні північні та північно-східні вітри тилової частини циклону в морі Баффіна, протоці Дейвіса та виніс криги в море Лабрадор, чим активізує збільшення льодового покриву. Високе початкове значення на рівні 10° демонструє визначальний вплив глобальної атмосферної циркуляції на льодовитість. Повільне зростання коефіцієнтів зі зменшенням кроку осереднення від 10° до $2,5^{\circ}$ можна пояснити усуненням ефекту просторового згладжування. Подальша стабілізація показників при розрахунках від $2,5^{\circ}$ до точок доводить інваріантність (незалежність, стійкість) виявленого зв'язку між атмосферним і крижаним полями.

Проте значення КК з точністю до тисячних – $-0,563$, $-0,582$, $-0,596$, $-0,603$, $-0,604$, $-0,604$ (від 10-градусних квадратів до точок відповідно), забезпечують вищий рівень деталізації. У першому випадку природний масштаб зв'язку (граничний просторовий розмір сітки, на якому найповніше розкривається статистична залежність між параметрами) був крок $2,5^{\circ}$. Це була точка зламу тренду, до неї коефіцієнт кореляції посилювався, а після – стабілізувався. У другому випадку такою точкою виступає вже 1° і широтна смуга зони максимальних значень звужується від 5° ($67,5^{\circ}-72,5^{\circ}\text{N}$) до 2° ($69^{\circ}-71^{\circ}\text{N}$). Це доводить, що саме на масштабі 1° просторова здатність реаналізу досягає межі згладжування і виходить на реальну фізичну межу процесу.

Зміни для WS на 1-градусних квадратах вагоміші, ніж для MSLP, значущих коефіцієнтів побільшало майже в 7 разів, тепер їх 784 за період (є у кожному з 15 місяців), 474 з них від $|0,5|$ до $|0,6|$, 37 дорівнюють або вище $|0,6|$, максимальне значення $-0,671$ ($70 - 71^{\circ}\text{N}$, $79 - 80^{\circ}\text{W}$) у березні попереднього року (табл. 4). Найвагоміший внесок також у грудня – 211 випадків, у червні – 116, а на третьому місці січень попереднього року і березень попереднього року – по 94 (табл. 3). З рис. 4 можна побачити, що переважна частина коефіцієнтів знаходиться в полосі $15 - 48^{\circ}\text{W}$. Крім того, до перелічених раніше районів їх концентрації додалося кілька нових, але всі екстремуми знаходяться у високих широтах.

Таблиця 1 – Кількість значущих коефіцієнтів кореляції ряду річного приросту аномалій на 15 квітня з середньомісячними MSLP по інтервалах $0,48 \leq |r| < 0,5$ / $0,5 \leq |r| < 0,6$ / $|r| \geq 0,6$ у досліджуваному районі за період обчислень

Table 1 – Number of significant correlation coefficients between the series of annual anomaly increments on April 15 and monthly mean MSLP by intervals $0,48 \leq |r| < 0,5$ / $0,5 \leq |r| < 0,6$ / $|r| \geq 0,6$ in the study area for the calculation period

№	Місяць	Розмір квадратів			
		$10 \times 10^\circ$	$5 \times 5^\circ$	$2,5 \times 2,5^\circ$	$1 \times 1^\circ$
1					
2	Лютий п. р.				
3	Березень п. р.				
4	Квітень				
5	Травень		2 / 0 / 0	4 / 2 / 0	29 / 8 / 0
6	Червень				
7	Липень	5 / 0 / 0	14 / 5 / 0	59 / 19 / 0	355 / 122 / 0
8	Серпень				
9	Вересень				
10	Жовтень				
11	Листопад		1 / 0 / 0	2 / 0 / 0	19 / 0 / 0
12	Грудень	2 / 23 / 0	26 / 66 / 0	59 / 296 / 0	328 / 1834 / 8
13	Січень				
14	Лютий	2 / 0 / 0	2 / 4 / 0	15 / 13 / 0	101 / 78 / 0
15	Березень				
16	За період	9 / 23 / 0	45 / 75 / 0	139 / 330 / 0	832 / 2042 / 8

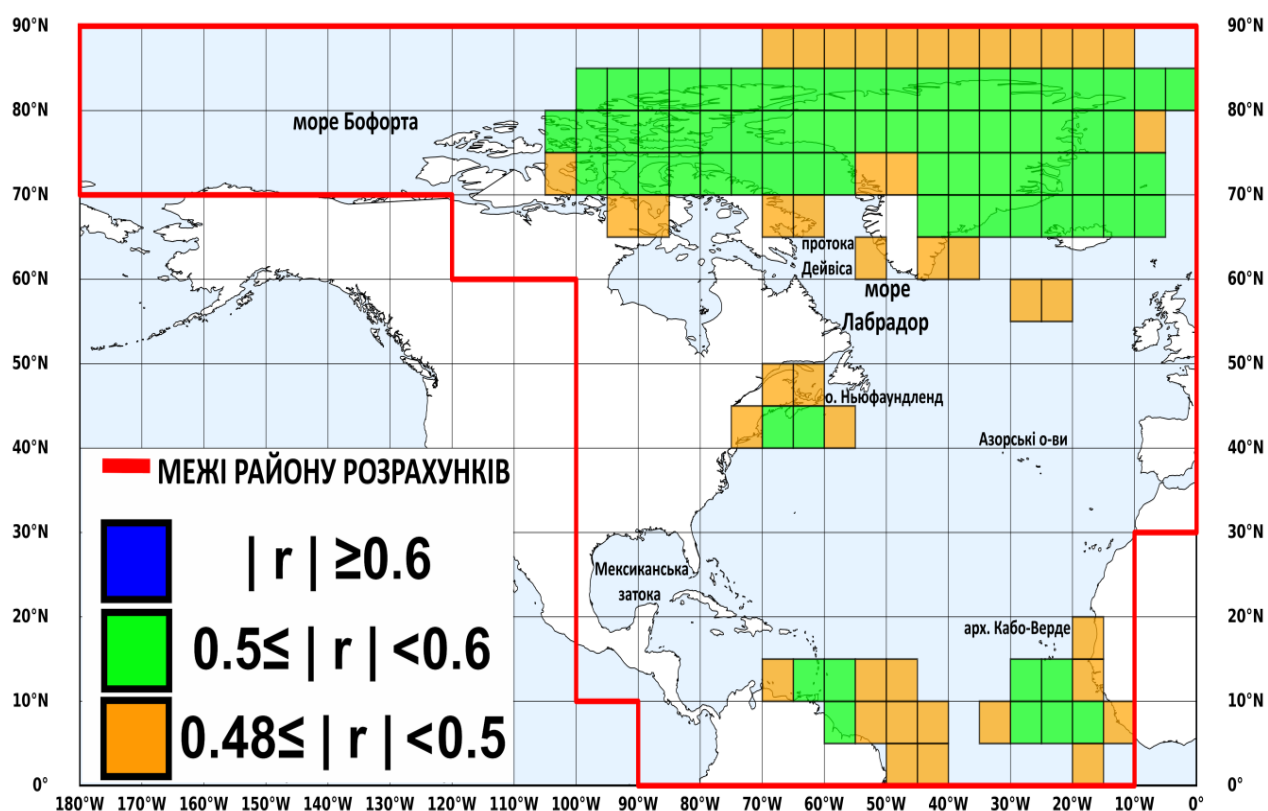


Рис. 1 – Розподіл значущих коефіцієнтів кореляції між максимальним поширенням криги в протоці Дейвіса та морі Лабрадор і MSLP на 5-градусних квадратах за 15 місяців

Fig. 1 – Distribution of significant correlation coefficients between the maximum ice extent in the Davis Strait and the Labrador Sea and MSLP on 5-degree squares over 15 months

Таблиця 2 – Максимальні показники значущих коефіцієнтів кореляції ряду річного приросту аномалій на 15 квітня з середньомісячними MSLP у досліджуваному районі за період обчислень

Table 2 – Maximum values of significant correlation coefficients between the series of annual anomaly increments on April 15 and monthly mean MSLP in the study area for the calculation period

№	Місяць	Квадрати, точки					
		10×10°	5×5°	2,5×2,5°	1×1°	0,5×0,5°	Точки
1	Січень п. р.						
2	Лютий п. р.						
3	Березень п. р.						
4	Квітень						
5	Травень		-0,497	-0,505	-0,506	-0,507	-0,506
6	Червень						
7	Липень	0,488	0,505	0,519	0,524	0,524	0,524
8	Серпень						
9	Вересень						
10	Жовтень						
11	Листопад		-0,481	-0,485	-0,488	-0,489	-0,493
12	Грудень	-0,563	-0,582	-0,596	-0,603	-0,604	-0,604
13	Січень						
14	Лютий	0,492	0,512	0,517	0,523	0,524	0,524
15	Березень						

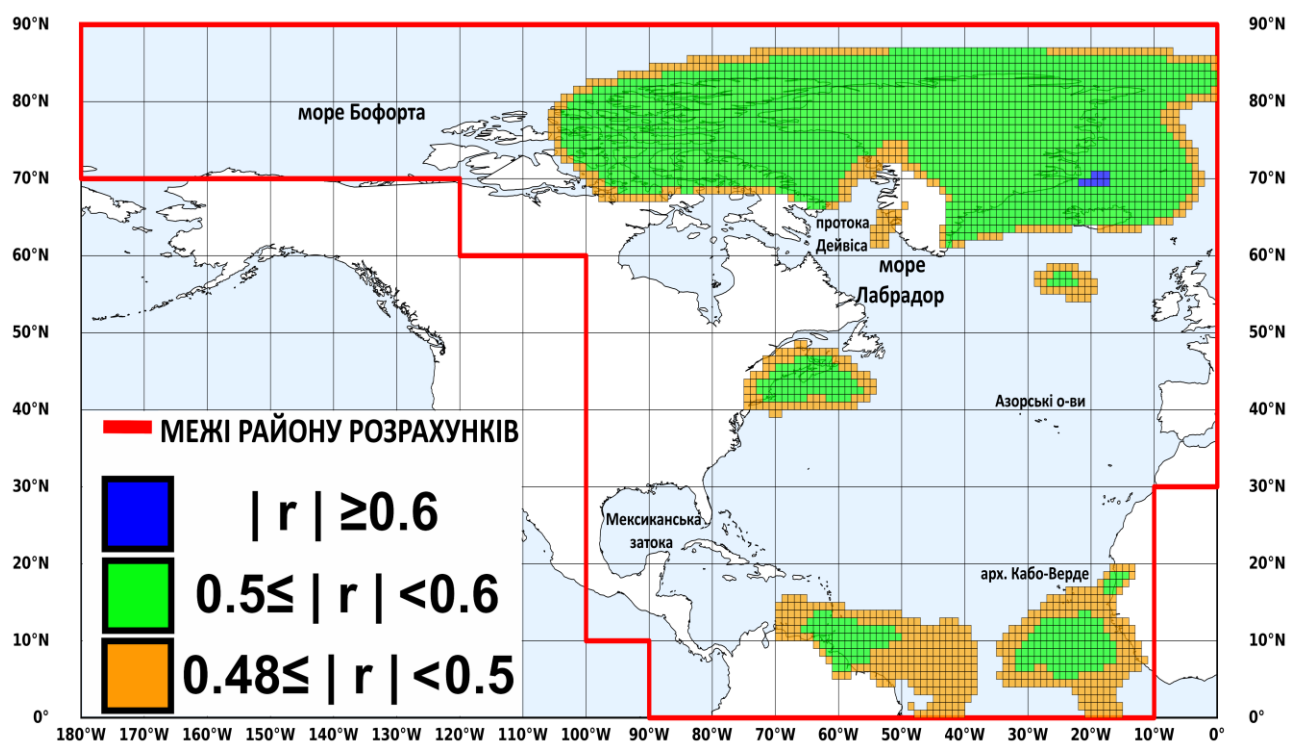


Рис. 2 – Розподіл значущих коефіцієнтів кореляції між максимальним поширенням криги в протоці Дейвіса та морі Лабрадор і MSLP на 1-градусних квадратах за 15 місяців

Fig. 2 – Distribution of significant correlation coefficients between the maximum ice extent in the Davis Strait and the Labrador Sea and MSLP on 1-degree squares over 15 months

На відміну від MSLP, для швидкості вітру зменшення розміру квадратів до 0,5 градуса виявилось ефективнішим. Тепер у 8 місяцях (до

цього в 5) з'явилися коефіцієнти від $|0,6|$ і вище, загалом – 162 (перед цим – 37). Майже всі, крім чотирьох, знаходяться вище 48° N. Рекордсмен за

їх наявністю – грудень (66), від нього трохи відстає березень попереднього року (61), вклади інших місяців не такі суттєві. Найвищий показник фактично такий самий – -0,668 (70,5 – 71°N, 79,5 – 80°W) у березні попереднього року. При визначенні значущих коефіцієнтів в точках суттєвих зрушень не відбулося, першість знов за березнем попереднього року – -0,672 (70.5° N – 79.5°W) (табл. 4).

В підсумку, проведена робота дозволила виявити наступні особливості розподілу значущих коефіцієнтів кореляції між квазістаціонарними рядами цифрового ряду аномалій поширення льоду на 15 квітня за період з 1979 по 2023 рік і середньомісячними рядами атмосферного тиску на рівні моря та швидкості вітру на висоті 10 м у районі, що вивчався. Статистичні зв'язки з MSLP за досліджуваний період спостерігалися у травні (крім 10-градусних квадратів), листопаді (крім 10-градусних квадратів), грудні (переважна частка випадків) і лютому. В цілому за досліджуваний період значущих коефіцієнтів було надзвичайно багато (за рахунок грудня). Вже на 10-градусних квадратах їх значення досягали -0,50 – -0,56 (23 випадки), але при подальшому зменшенні сітки до 1–0,5 градусів вони лише дорівнювали або трохи перевищували -0,60 (30 випадків на 0,5-градусних квадратах). Можна сказати, що коефіцієнтам властива чітка просторово-часова локалізація: вирізняються 6 областей, де вони згруповані в певні місяці року, поза ними немає жодного. Сама велика область знаходиться в субполярних і полярних широтах Північної півкулі між 0–105°W (грудень). В ній, у Гренландському морі, біля входу у Датську протоку, можна виокремити невеличку ділянку з оцінками від |0,6| і вище (рис.2). Дві середні за розмірами області знаходяться в західній і східній частинах тропічної зони Північної Атлантики та прилеглих узбережжях (червень) з більшістю показників до |0,5|. В цьому ж регіоні, але лише в східній частині Північної Атлантики, в лютому є ще одна аналогічна область, де спостерігається незначне переважання коефіцієнтів у діапазоні до |0,5|. Їм дещо поступається район на південний захід від острова Ньюфаундленд (грудень), де більшість оцінок від |0,5| і вище. Є ще дві порівняно невеликі локації, перша в травні – на південний захід від острова Ісландія, друга в листопаді – частково на західному узбережжі Гренландії і частково в протоці Дейвіса (тут значення лише до |0,5|).

Значуща кореляція з WS, порівняно з MSLP, спочатку виглядала менш переконливо, але

поступово, зі зменшенням розмірів сітки, дала вагоміші результати. Так, починаючи з 1-градусних квадратів, статистична залежність була виявлена для кожного з 15 місяців періоду. На 0,5-градусному рівні і в точках показники |0,6| і вище спостерігалися у восьми місяцях періоду, найчастіше в грудні та березні попереднього року, а їх загальна кількість приблизно в 5 разів більша, ніж для MSLP. Переважну частку зафіксовано у високих широтах також, але є по два випадки у Мексиканській затоці і біля Азорських островів. Максимальне значення коефіцієнтів зросло з |0,54| (10-градусні квадрати) до |0,67| (1 – 0,5-градусні квадрати, точки) (табл. 4). На відміну від MSLP, чітка просторова локалізація не простежується. Є біля 10 відносно великих областей зі значущими коефіцієнтами та багато маленьких по всьому досліджуваному району (рис. 4).

Поле вітру, порівняно з тиском, більш мінливе, динамічне і чутливе до зміни розміру сітки. Спочатку також розглянемо максимальні по модулю значення показників, округлені до сотих: 0,54, 0,6, 0,61/-0,61, -0,67, -0,67, -0,67 (від 10-градусних квадратів до точок відповідно) (табл.4). Кореляція по великих площах (10°) штучно згладжувала локальні горизонтальні баричні градієнти, максимумами швидкості і нейтралізувала різноспрямовані повітряні потоки. На 5° – 2,5° спостерігається нівелювання цього процесу. Залежність посилюється за рахунок переходу від мультибаричної структури при осередненні до монобаричної, завдяки чому вдалося диференціювати різноорієнтовані повітряні течії і коефіцієнти зросли в деяких випадках до 0,60 і вище. Аналогічна інтенсифікація показників відбувається при переході з масштабу 2,5° до 1° з подальшою стабілізацією при зменшенні кроку дискретизації. Це свідчить, що починаючи з 1° повітряні потоки стають просторово однорідними, строго локалізований мезомасштабний сигнал цього діапазону є домінантним і не руйнується під впливом мікромасштабних процесів.

Використання КК з точністю до тисячних – 0,542, 0,596, 0,611/-0,609, -0,671, -0,668, -0,672 (від 10-градусних квадратів до точок відповідно) (табл. 4), як і у випадку з приземним тиском, дозволяє суттєво уточнити попередні висновки. Формально, визначений раніше природний масштаб зв'язку не зазнав змін, але таке твердження буде коректним лише без урахування просторової локалізації зон максимальної кореляції. Серед них можна виділити два ключові

Таблиця 3 – Кількість значущих коефіцієнтів кореляції ряду річного приросту аномалій на 15 квітня з середньомісячними WS по інтервалах $0,48 \leq |r| < 0,5$ / $0,5 \leq |r| < 0,6$ / $|r| \geq 0,6$ у досліджуваному районі за період обчислень

Table 3 – Number of significant correlation coefficients between the series of annual anomaly increments on April 15 and monthly mean WS by intervals $0,48 \leq |r| < 0,5$ / $0,5 \leq |r| < 0,6$ / $|r| \geq 0,6$ in the study area for the calculation period

№	Місяць	Розмір квадратів			
		10×10°	5×5°	2,5×2,5°	1×1°
1	Січень п. р.	1 / 0 / 0	1 / 3 / 0	6 / 8 / 1	30 / 61 / 3
2	Лютий п. р.		0 / 1 / 0	1 / 2 / 1	14 / 17 / 2
3	Березень п. р.		1 / 2 / 0	3 / 9 / 1	27 / 52 / 15
4	Квітень				8 / 9 / 0
5	Травень		1 / 0 / 0	1 / 0 / 0	6 / 1 / 0
6	Червень	2 / 1 / 0	3 / 5 / 0	8 / 12 / 0	51 / 65 / 0
7	Липень				1 / 1 / 0
8	Серпень			1 / 0 / 0	9 / 1 / 0
9	Вересень			1 / 1 / 0	7 / 6 / 0
10	Жовтень	0 / 1 / 0	1 / 1 / 0	4 / 11 / 0	22 / 67 / 0
11	Листопад		1 / 0 / 0	1 / 0 / 0	4 / 2 / 0
12	Грудень	0 / 1 / 0	5 / 4 / 0	4 / 25 / 1	61 / 134 / 16
13	Січень		0 / 1 / 0	3 / 3 / 0	9 / 16 / 0
14	Лютий			1 / 1 / 0	8 / 15 / 0
15	Березень		0 / 1 / 0	3 / 5 / 0	16 / 27 / 1
16	За період	3 / 3 / 0	13 / 18 / 0	37 / 77 / 4	273 / 474 / 37

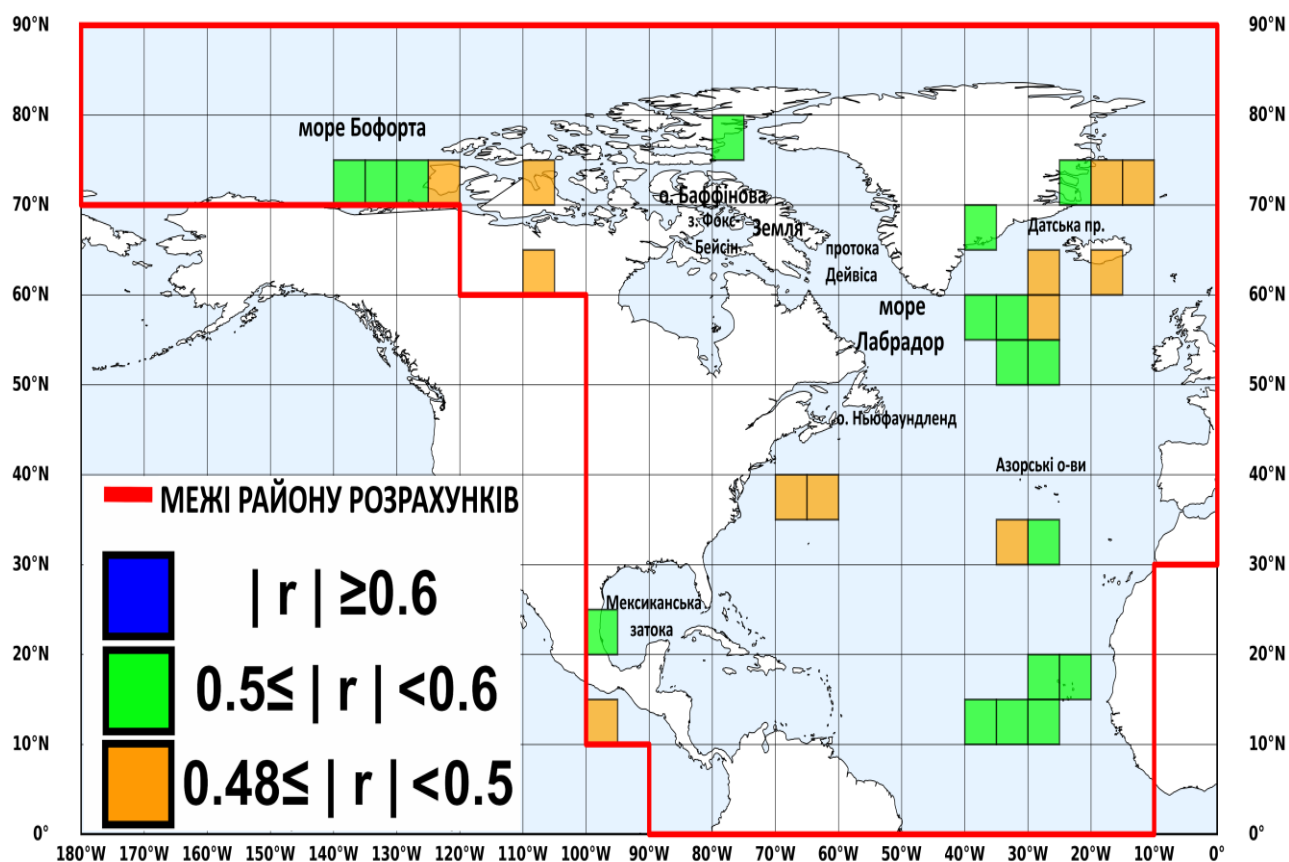


Рис. 3 – Розподіл значущих коефіцієнтів кореляції між максимальним поширенням криги в протоці Дейвіса та морі Лабрадор і WS на 5-градусних квадратах за 15 місяців

Fig. 3 – Distribution of significant correlation coefficients between the maximum ice extent in the Davis Strait and the Labrador Sea and WS on 5-degree squares over 15 months

Таблиця 4 – Максимальні показники значущих коефіцієнтів кореляції ряду річного приросту аномалій на 15 квітня з середньомісячними WS у досліджуваному районі за період обчислень

Table 4 – Maximum values of significant correlation coefficients between the series of annual anomaly increments on April 15 and monthly mean WS in the study area for the calculation period

№	Місяць	Квадрати, точки					
		10×10°	5×5°	2,5×2,5°	1×1°	0,5×0,5°	Точки
1	Січень п. р.	-0,496	-0,548	-0,604	-0,609	-0,610	-0,609
2	Лютий п. р.		0,500	0,611	0,643	0,651	0,659
3	Березень п. р.		0,509	-0,609	-0,671	-0,668	-0,672
4	Квітень				0,529	0,530	0,544
5	Травень		0,488	0,480	0,511	-0,529	-0,543
6	Червень	0,532	0,522	0,545	0,555	0,562	0,566
7	Липень				0,509	0,519	-0,516
8	Серпень			0,481	0,515	0,557	0,549
9	Вересень			-0,504	-0,530	-0,550	-0,547
10	Жовтень	-0,510	-0,583	-0,588	-0,597	-0,603	-0,605
11	Листопад		-0,484	-0,480	0,507	-0,529	0,578
12	Грудень	0,542	0,596	0,604	0,641	0,646	0,646
13	Січень		-0,545	-0,556	-0,586	-0,609	-0,620
14	Лютий			-0,521	-0,590	-0,609	-0,615
15	Березень		0,589	0,598	0,624	0,630	0,631

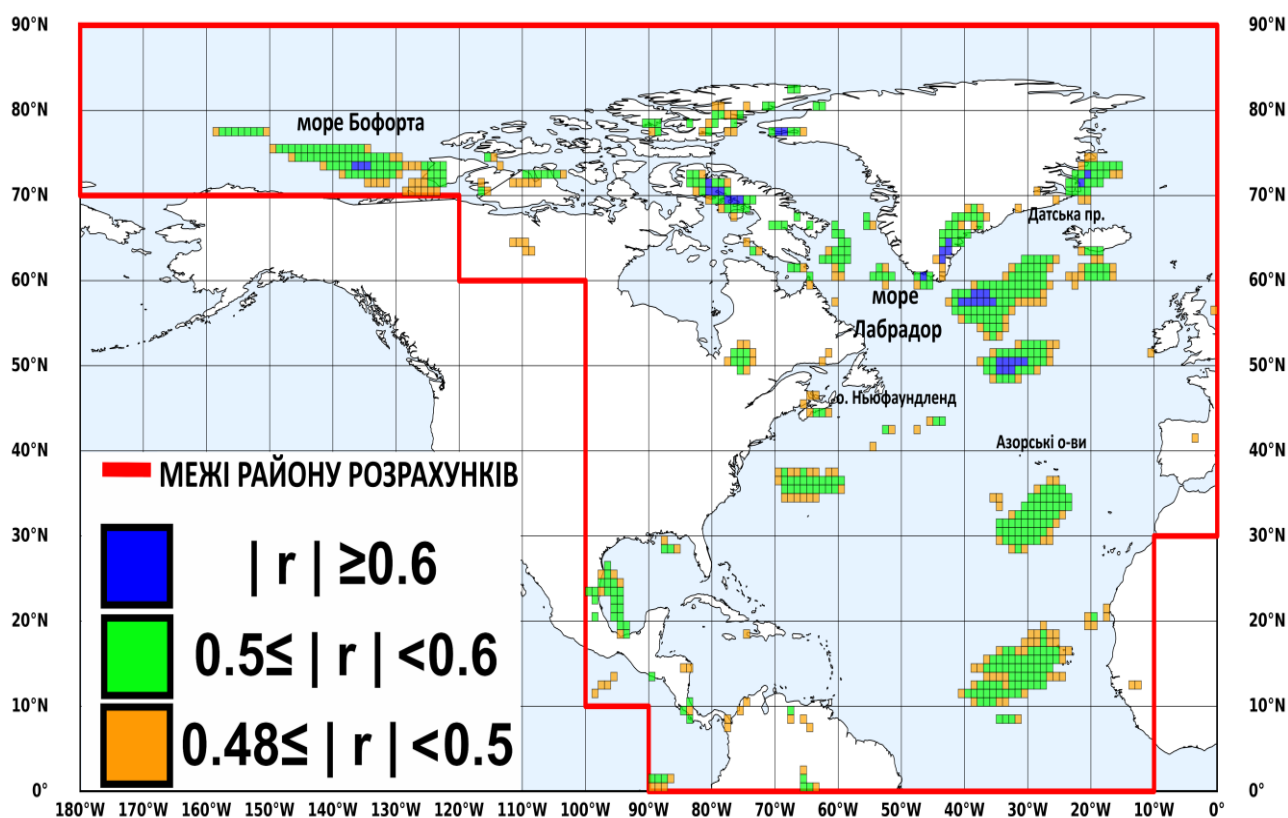


Рис. 4 – Розподіл значущих коефіцієнтів кореляції між максимальним поширенням криги в протоці Дейвіса та морі Лабрадор і WS на 1-градусних квадратах за 15 місяців

Fig. 4 – Distribution of significant correlation coefficients between the maximum ice extent in the Davis Strait and the Labrador Sea and WS on 1-degree squares over 15 months

осередки з найвищими показниками. Перший, з коефіцієнтами 0,611, 0,643, 0,651, 0,659 у лютому попереднього року (від 2,5-градусних квадратів

до точок відповідно) знаходиться на північно-західному узбережжі о. Гренландія поряд з протокою Сміта біля широти 78° N (рис. 4,

табл. 4). У розпал зимового періоду тут, завдяки величезній висоті крижаного щита острова і гравітації, переважають шквальні катабатичні вітри, часто ураганної сили. Зриваючись зі схилів, вони, з одного боку, руйнують льодовий покрив і відносять уламки на схід в течію Баффіна, яка транспортує їх на південь, а з іншого боку потужна адвекція холоду посилює процеси утворення морської криги. Описаний механізм виступає фізичним підтвердженням прямого зв'язку досліджуваних параметрів і позитивного знаку коефіцієнтів. Слабо виражене монотонне зростання ряду з максимумом на рівні точок демонструє асимптотичне наближення до екстремальних значень на ультрависокій деталізації. На цьому рівні база даних реаналізу ERA5 спроможна найкраще врахувати вплив складного скелястого, порізаного фіордами рельєфу на повітряні потоки.

Другий осередок, з коефіцієнтами -0,609, -0,671, -0,668, -0,672 (від 2,5-градусних квадратів до точок відповідно) розташований на острові Баффінова Земля, поряд з північною частиною затоки Фокс-Бейсін, в районі 70° N (рис. 4, табл. 4). Місцева орографія більш згладжена, ніж на узбережжі Гренландії, але це також піднятий гористий суходіл, хвилясте плато, яке різко обривається при переході до берегової лінії. Повітряні потоки на ньому можуть відчутно змінювати напрямок і швидкість, до того ж, у березні активізуються та поглиблюються весняні циклони над Канадським Арктичним архіпелагом, що виступає додатковим чинником інтенсифікації варіативності характеристик вітру. Виражена просторово-часова мінливість горизонтального переносу над порізаною підстильною поверхнею Баффінової Землі призводить до математичного згладжування пікових швидкостей на стиках розрахункових комірок і незначного просідання коефіцієнта кореляції на рівні 0,5°. Зазначений ефект не фіксувався в першому осередку через домінування потужних стокових вітрів з вищим ступенем стабілізації повітряних потоків. Розрахунок безпосередньо в точках знімає ці суто геометричні обмеження штучної сітки і показник зростає до свого максимуму (-0,672).

Слід зазначити, що березневі циклони, рухаючись переважно на південний схід, над морем Баффіна та протокою Дейвіса, частково блокують льодовий «конвеєр» в бік моря Лабрадор. Великі дрейфуючі крижані поля внаслідок штормової активності можуть сповільнюватись зустрічними вітрами, навалюватися на західні скелясті береги,

створюючи зони інтенсивного торошення при щільному стисненні, відноситися на схід до теплої Західно-Гренладської течії, спрямованої на північ. Комплексна дія цих факторів стримує поширення криги в межах досліджуваної акваторії, що зумовлює від'ємні знаки коефіцієнтів кореляції.

4. ВИСНОВКИ

В результаті виконаної роботи у досліджуваному районі знайдено кілька областей / точок, що знаходяться у різних широтних зонах, від тропіків до високих широт, де показники атмосферного тиску на рівні моря і швидкості вітру на рівні 10 м суттєво впливають на розповсюдження льодового покриву на 15 квітня в Дейвісовій протоці та морі Лабрадор. Для значущих коефіцієнтів кореляції між квазістаціонарними рядами цифрового ряду аномалій і атмосферним тиском властивий чіткий просторово-часовий розподіл з максимальними оцінками в Гренландському морі, біля входу у Датську протоку в грудні. У випадку з приземним вітром екстремальні величини від [0,6] і вище спостерігаються, з поодинокими випадками, у високих широтах від моря Бофорта до 20°W у січні – березні попереднього року, жовтні (на південь від Азорських островів), грудні, січні (в Мексиканській затоці), лютому та березні.

Оптимальним просторовим кроком дискретизації для визначення залежності максимального розповсюдження криги у протоці Дейвіса та морі Лабрадор від тиску на рівні моря є осереднення по 1° квадратам.

У разі пошуку статистичного зв'язку з швидкістю вітру на висоті 10 м цей масштаб виступає лише загальним базовим порогом, а для усунення геометричних спотворень розрахункової сітки реаналізу та коректного врахування орографічних чинників необхідні обчислення на рівні точок. Максимальна статистична залежність між зазначеними параметрами для лютого попереднього року і березня попереднього року вказує на відчутну часову інерційність атмосфери-океанічної системи даного району.

Отримані у ході досліджень результати створюють важливе підґрунтя для оптимізації льодової навігації в сучасних умовах на початку перспективного альтернативного маршруту з Атлантичного океану в Тихий та підвищення безпеки судноплавства. Виявлені статистичні залежності дають підстави припускати у подальшому можливість прогнозування

максимальної площі крижаного поля в Дейвісовій протоці та морі Лабрадор.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Navigating Troubled Waters: The Impact to Global Trade of Disruption of Shipping Routes in the Red Sea, Black Sea and Panama Canal*: Special Report / UNCTAD. (2024). Geneva: United Nations. 22 p. URL: <https://unctad.org/navigating-troubled-waters> (дата звернення: 30.03.2026)
2. UNCTAD. (2025). *Review of Maritime Transport 2025: Staying the Course in Turbulent Waters*. (UNCTAD/RMT/2025). Geneva: United Nations. 168 p. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025_en.pdf (дата звернення: 30.03.2026)
3. Rantanen M. et al. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth Environ.*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
4. Riordon J. (2025). [NASA](https://www.nasa.gov/earth/arctic-winter-sea-ice-at-record-low/), NSIDC Scientists Say Arctic Winter Sea Ice at Record Low. URL: <https://www.nasa.gov/earth/arctic-winter-sea-ice-at-record-low/> (дата звернення: 30.03.2026)
5. Arctic sea ice hits record low maximum extent for the year. (2025). National Snow and Ice Data Center. URL: <https://nsidc.org/news-analyses/news-stories/arctic-sea-ice-hits-record-low-maximum-extent-year> (дата звернення: 20.03.2026)
6. Dawson J. D., Cook A. J., Holloway J. E., Copland L. (2022). Analysis of Changing Levels of Ice Strengthening (Ice Class) among Vessels Operating in the Canadian Arctic over the Past 30 Years. *Arctic*, Vol. 75, No. 4, P. 398–414. <https://doi.org/10.14430/arctic75553>
7. Chen J., Kang S., You Q., Zhang Y., Du W. (2022). Projected changes in sea ice and the navigability of the Arctic Passages under global warming of 2°C and 3°C. *Anthropocene*, Vol. 40, 100349. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2022.100349>
8. Taylor P. C., Boeke R. C., Boisvert L. N. et al. (2022). Process Drivers, Inter-Model Spread, and the Path Forward: A Review of Amplified Arctic Warming. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 9, Art. 758361. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.758361>
9. Mudryk L. R., Dawson J., Howell S. E. L., Derksen C., Zagon T., Johnston M. (2021). Impact of 1, 2 and 4 °C of global warming on ship navigation in the Canadian Arctic. *Nature Climate Change*, Vol. 11, P. 673–679. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01087-6>
10. Cook A. J., Dawson J., Howell S. E. L. et al. (2024). Sea ice choke points reduce the length of the shipping season in the Northwest Passage. *Commun. Earth Environ.*, 5, 362. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01477-6>
11. Liang Y.-F., Zhang Y., Guo H.-L., Chen C.-S., Shao W.-Z., Zhou Y., Wang D.-S. (2025). Projection of sea ice conditions in the Canadian Arctic Archipelago based on CMIP6 assessments. *Advances in Climate Change Research*, Vol. 16, Iss. 3, P. 473–489. <https://doi.org/10.1016/j.accres.2025.02.008>
12. Kvamstø N. G., Skeie P., Stephenson D. B. (2004). Impact of Labrador Sea-ice extent on the North Atlantic Oscillation. *International Journal of Climatology*, Vol. 24, no. 5, P. 603–612. <https://doi.org/10.1002/joc.1015>
13. Deser C., Walsh J. E., Timlin M. S. (2000). Arctic Sea Ice Variability in the Context of Recent Atmospheric Circulation Trends. *Journal of Climate*, Vol. 13, no. 3, P. 617–633. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0617:ASIVIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0617:ASIVIT>2.0.CO;2)
14. Peterson I. K., Symonds G. (1988). *Ice floe trajectories off Labrador and eastern Newfoundland: 1985–1987*. (Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences, No. 104). Dartmouth, Nova Scotia: Physical and Chemical Sciences Branch, Bedford Institute of Oceanography. 115 p. URL: <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/106106.pdf> (дата звернення: 10.04.2026)
15. Liang Y. et al. (2021). Role of Extratropical Wintertime Cyclones in Regulating the Variations of Baffin Bay Sea Ice Export. *JGR Atmospheres*, Vol. 126, no. 5. <https://doi.org/10.1029/2020JD033616>
16. Малуґа Є. Є., Гаврилюк Р. В. (2023). Міжрічна мінливість льодового покриву в протоці Дейвіса та морі Лабрадор за період з 1979 по 2023 рр. *Український гідрометеорологічний журнал*, №32, С. 80–94. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.06>
17. Climate Reanalyzer. URL: https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/ (дата звернення: 10.03.2026)
18. Ding S., Chen X., Zhang X., Zhang X., Xu P. (2024). A Review on the Arctic –Midlatitudes Connection: Interactive Impacts, Physical Mechanisms, and Nonstationary Atmosphere. *Atmosphere*, Vol. 15, iss. 9, Art. 1115. <https://doi.org/10.3390/atmos15091115>
19. Iles C. E., Samset B. H., Lund M. T. (2025). How polar–midlatitude atmospheric teleconnections depend on regional sea ice fraction and global warming level. *Earth System Dynamics*, Vol. 16, P. 2253–2272. <https://doi.org/10.5194/esd-16-2253-2025>
20. Henderson G. R., Barrett B. S., Wachowicz L. J. et al. (2021). Local and Remote Atmospheric Circulation Drivers of Arctic Change: A Review. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 9, Art. 709896. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.709896>
21. Duan A., Li X., Hu W. et al. (2025). Climate teleconnections among the Earth's three poles. *Science Bulletin*, Vol. 70, iss. 22, P. 3908–3918. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2025.09.045>
22. Matsumura S., Kosaka Y. (2019). Arctic–Eurasian climate linkage induced by tropical ocean variability. *Nature Communications*, Vol. 10, Art. 3441. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11359-7>

REFERENCES

1. UNCTAD (2024). *Navigating Troubled Waters: The Impact to Global Trade of Disruption of Shipping Routes in the Red Sea, Black Sea and Panama Canal*: Special Report. Geneva: United Nations. Available at: <https://unctad.org/navigating-troubled-waters> (Accessed: 30.03.2026).
2. UNCTAD (2025). *Review of Maritime Transport 2025: Staying the Course in Turbulent Waters*. UNCTAD/RMT/2025. Geneva: United Nations. Available at: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025_en.pdf (Accessed: 30.03.2026).
3. Rantanen, M. et al. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth Environ.*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
4. Riordon, J. (2025). NASA, NSIDC Scientists Say Arctic Winter Sea Ice at Record Low. Available at: <https://www.nasa.gov/earth/arctic-winter-sea-ice-at-record-low/> (Accessed: 30.03.2026).
5. National Snow and Ice Data Center (2025). Arctic sea ice hits record low maximum extent for the year. Available at: <https://nsidc.org/news-analyses/news-stories/arctic-sea-ice-hits-record-low-maximum-extent-year> (Accessed: 20.03.2026).
6. Dawson, J.D., Cook, A.J., Holloway, J.E. & Copland, L. (2022). Analysis of Changing Levels of Ice Strengthening (Ice Class) among Vessels Operating in the Canadian Arctic over the Past 30 Years. *Arctic*, 75(4), pp. 398–414. <https://doi.org/10.14430/arctic75553>

7. Chen, J., Kang, S., You, Q., Zhang, Y. & Du, W. (2022). Projected changes in sea ice and the navigability of the Arctic Passages under global warming of 2°C and 3°C. *Anthropocene*, 40, 100349. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2022.100349>
8. Taylor, P.C., Boeke, R.C., Boisvert, L.N. et al. (2022). Process Drivers, Inter-Model Spread, and the Path Forward: A Review of Amplified Arctic Warming. *Frontiers in Earth Science*, 9, 758361. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.758361>
9. Mudryk, L.R., Dawson, J., Howell, S.E.L., Derksen, C., Zagon, T. & Johnston, M. (2021). Impact of 1, 2 and 4 °C of global warming on ship navigation in the Canadian Arctic. *Nature Climate Change*, 11, pp. 673-679. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01087-6>
10. Cook, A.J., Dawson, J., Howell, S.E.L. et al. (2024). Sea ice choke points reduce the length of the shipping season in the Northwest Passage. *Commun Earth Environ*, 5, 362. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01477-6>
11. Liang, Y.-F., Zhang, Y., Guo, H.-L., Chen, C.-S., Shao, W.-Z., Zhou, Y. & Wang, D.-S. (2025). Projection of sea ice conditions in the Canadian Arctic Archipelago based on CMIP6 assessments. *Advances in Climate Change Research*, 16(3), pp. 473-489. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2025.02.008>
12. Kvamstø, N.G., Skeie, P. & Stephenson, D.B. (2004). Impact of Labrador Sea-ice extent on the North Atlantic Oscillation. *International Journal of Climatology*, 24(5), pp. 603-612. <https://doi.org/10.1002/joc.1015>
13. Deser, C., Walsh, J.E. & Timlin, M.S. (2000). Arctic Sea Ice Variability in the Context of Recent Atmospheric Circulation Trends. *Journal of Climate*, 13(3), pp. 617-633. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0617:ASIVIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0617:ASIVIT>2.0.CO;2)
14. Peterson, I.K. & Symonds, G. (1988). *Ice floe trajectories off Labrador and eastern Newfoundland: 1985–1987*. Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences, No. 104. Dartmouth, Nova Scotia: Physical and Chemical Sciences Branch, Bedford Institute of Oceanography. Available at: <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/106106.pdf> (Accessed: 10.04.2026).
15. Liang, Y. et al. (2021). Role of Extratropical Wintertime Cyclones in Regulating the Variations of Baffin Bay Sea Ice Export. *JGR Atmospheres*, 126(5). <https://doi.org/10.1029/2020JD033616>
16. Malyuga, E.Ye. & Gavriluk, R.V. (2023). [Interannual Variability of Ice Cover across Davis Strait and the Labrador Sea for the Period from 1979 to 2023]. *Ukrainskyi hidrometeorologichnyi zhurnal* [Ukrainian hydrometeorological journal], 32, pp. 80-94. <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.06> (in Ukr.)
17. Climate Reanalyzer. Available at: https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/ (Accessed: 10.03.2026).
18. Ding, S., Chen, X., Zhang, X., Zhang, X. & Xu, P. (2024). A Review on the Arctic –Midlatitudes Connection: Interactive Impacts, Physical Mechanisms, and Nonstationary Atmosphere. *Atmosphere*, 15(9), 1115. <https://doi.org/10.3390/atmos15091115>
19. Iles, C.E., Samset, B.H. & Lund, M.T. (2025). How polar–midlatitude atmospheric teleconnections depend on regional sea ice fraction and global warming level. *Earth System Dynamics*, 16, pp. 2253-2272. <https://doi.org/10.5194/esd-16-2253-2025>
20. Henderson, G.R., Barrett, B.S., Wachowicz, L.J. et al. (2021). Local and Remote Atmospheric Circulation Drivers of Arctic Change: A Review. *Frontiers in Earth Science*, 9, 709896. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.709896>
21. Duan, A., Li, X., Hu, W. et al. (2025). Climate teleconnections among the Earth's three poles. *Science Bulletin*, 70(22), pp. 3908-3918. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2025.09.045>
22. Matsumura, S. & Kosaka, Y. (2019). Arctic–Eurasian climate linkage induced by tropical ocean variability. *Nature Communications*, 10, 3441. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11359-7>

DEPENDENCE OF MAXIMUM ICE EXTENT IN THE DAVIS STRAIT AND THE LABRADOR SEA WITH ATMOSPHERIC PRESSURE AND SURFACE WIND SPEED IN THE NORTH ATLANTIC AND THE ARCTIC OCEANS

E. E. Maliuha¹, R. V. Gavriluk²

¹National University «Odesa Maritime Academy»,
8 Didrihsona St., 65000, Odesa, Ukraine,
eduard241965@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0005-0039-9837>

²Odesa I. I. Mechnikov National University,
2 V. Zmiienka Str., 65082 Odesa, Ukraine,
RAISAGAVR@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0002-9129-3293>

The Arctic region has undergone unprecedented climate changes over recent decades, with air temperatures there rising much more significantly than in other parts of the globe. This phenomenon has been termed "Arctic amplification." Alongside other consequences, it has triggered a rapid reduction in ice cover, including within the Northwest Passage, which under modern conditions is set to play an increasingly important role in global shipping. Considering global trends in maritime logistics—evidenced by declining throughput in the Panama Canal (due to significant climate-driven shallowing) and the Red Sea (due to military actions)—the passage emerges as a promising new route that significantly reduces transport distances between North America, Europe, and East Asia. Therefore, issues regarding ice regime dynamics in the Davis Strait and the Labrador Sea, where the route to the Pacific Ocean begins, carry significant importance.

Ice melting stems primarily from meteorological conditions. These include such interrelated quantities as surface wind speed and sea-level atmospheric pressure. Horizontal pressure gradients determine the parameters of airflows, which in turn can cause heat advection or enhance ice drift, contributing to its fragmentation and the formation of open water. Open water, in turn, absorbs more solar radiation, intensifying local heating and subsequent melting. This work uses statistical analysis as its methodological basis to determine the pronounced dependence between the maximum ice extent in the Davis Strait and the Labrador Sea and these two factors.

In accordance with the set objective, this study identifies correlations between a quasi-stationary time series of ice extent anomalies as of April 15 for the period 1979–2023 (obtained from the authors' previous research) and the monthly mean series of sea-level atmospheric pressure and wind speed at a 10 m height. The calculations were performed incrementally for 10° to 0.5° squares and for specific points in the North Atlantic and its surrounding continental areas, as well as for Greenland, the Canadian Arctic, and a small region of the equatorial Pacific Ocean. Based on the calculation results, the study describes the features of the spatio-temporal distribution of correlation coefficients and identifies regions and points where these coefficients reach extreme values.

The obtained data create a foundation for enabling further prediction of ice extent in the Davis Strait and the Labrador Sea, aiming to prolong the navigation season and enhance maritime safety within the context of modern realities.

Keywords: sea ice cover; Davis Strait; Labrador Sea; Northwest Passage; ice extent; sea-level atmospheric pressure; wind speed

*Подання до редакції : 23. 01. 2026
Надходження остаточної версії : 24. 03. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026*

УДК: 631.527:631.526.5(477.51)

ОЦІНКА БАЛАНСУ БІОГЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІВДЕННИХ РАЙОНІВ УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ СУЧАСНИХ УМОВ ВИРОЩУВАННЯ ЯРОГО ЯЧМЕНЮ

П.С. Нікітін, В. Г. Ільїна

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
вул. Всеволода Змієнка, 2, 65082, Одеса, Україна, agroecology87@gmail.com,
<https://orcid.org/0009-0004-5755-4116>, <https://orcid.org/0000-0001-5781-701X>

У роботі наведено результати комплексного оцінювання балансу біогенних елементів в агроекосистемах Південного Степу України за сучасних умов вирощування ярого ячменю. Метою дослідження було встановлення закономірностей формування балансу азоту, фосфору та калію під впливом агрокліматичних змін, трансформації структури посівних площ та особливостей застосування мінеральних добрив упродовж 2015-2025 рр. на території Одеської, Миколаївської, Херсонської та Запорізької областей.

Для досягнення поставленої мети використано балансовий метод оцінювання біогенних елементів, статистичний аналіз даних щодо посівних площ, урожайності ярого ячменю та внесення мінеральних добрив, а також агрокліматичний аналіз із застосуванням гідротермічного коефіцієнта Селянінова та показника посушливості Д. І. Шашко. Проведено оцінювання просторово-часових змін агрокліматичних умов, динаміки структури посівних площ, особливостей використання добрив та співвідношення між надходженням, винесенням і втратами біогенних елементів.

Встановлено стійку тенденцію до скорочення площ вирощування ярого ячменю в усіх досліджуваних регіонах, найбільш виражену в Херсонській області. Виявлено посилення процесів аридизації клімату, що проявляється зниженням значень гідротермічного коефіцієнта та зростанням показника посушливості. Найбільш несприятливі умови вологозабезпечення сформувалися в Херсонській та Запорізькій областях, де поєднання дефіциту атмосферної вологи та високих температур обмежує ефективність використання поживних речовин рослинами.

Встановлено домінування азотних добрив у структурі удобрення за недостатнього використання фосфорних і калійних добрив. Виявлено суттєві регіональні відмінності у рівнях внесення добрив, а також тенденцію до їх скорочення в окремих регіонах після 2021 року. Результати балансових розрахунків свідчать, що в усіх досліджуваних областях питомий винос біогенних елементів урожаєм систематично перевищує їх надходження з добривами, що призводить до формування стійкого від'ємного балансу азоту, фосфору та калію.

Отримані результати свідчать про посилення ризиків виснаження ґрунтових ресурсів агроекосистем Південного Степу України в умовах кліматичних змін та недостатньої компенсації винесення поживних речовин. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення систем удобрення, оцінювання екологічної стійкості агроландшафтів та прогнозування змін родючості ґрунтів у майбутньому.

Ключові слова: ярий ячмінь; баланс біогенних елементів; азот; фосфор; калій; гідротермічний коефіцієнт; посушливість; Південний Степ України.

1. ВСТУП

В умовах сучасних кліматичних змін територія Південного Степу України належить до регіонів із найбільш вираженими проявами аридизації, що супроводжується підвищенням температурного режиму, зростанням частоти посушливих явищ та погіршенням умов вологозабезпечення сільськогосподарських

культур. Посилення кліматичних ризиків суттєво впливає на функціонування агроекосистем, ефективність використання поживних речовин і процеси відтворення родючості ґрунтів. За таких умов особливого значення набуває оцінювання балансу біогенних елементів як одного з основних індикаторів екологічної стійкості агроландшафтів та раціональності використання земельних ресурсів.

Ярий ячмінь (*Hordeum vulgare* L.) є однією з провідних зернових культур Південного Степу України, яка характеризується високою адаптивністю до умов регіону та важливим значенням у структурі зернового виробництва. Водночас продуктивність культури значною мірою визначається рівнем забезпеченості рослин вологою та поживними речовинами, а також ефективністю застосування добрив. У сучасних умовах скорочення посівних площ, трансформації структури землекористування та зміни агротехнологій питання підтримання збалансованого кругообігу біогенних елементів набуває особливої актуальності [1, 2].

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених особливостям живлення ярого ячменю та впливу агрокліматичних чинників та його продуктивність, питання комплексного оцінювання балансу азоту, фосфору та калію в умовах сучасних кліматичних трансформацій Південного Степу України залишається недостатньо вивченим. Особливо актуальним є встановлення взаємозв'язків між динамікою агрокліматичних показників, змінами структури посівних площ, рівнем застосування мінеральних добрив та процесами формування дефіциту біогенних елементів.

Важливість таких досліджень обумовлена необхідністю розроблення науково обґрунтованих підходів до управління поживним режимом ґрунтів, адаптації систем удобрення до сучасних кліматичних умов та забезпечення довгострокового збереження продуктивності агроєкосистем. Оцінювання балансу біогенних елементів дозволяє визначити рівень компенсації внесення поживних речовин урожаєм, виявити потенційні ризики виснаження ґрунтів та оцінити перспективи сталого використання земельних ресурсів.

Метою дослідження є оцінювання балансу біогенних елементів в агроєкосистемах Південного Степу України при вирощуванні ярого ячменю на основі аналізу агрокліматичних умов, динаміки посівних площ, особливостей застосування мінеральних добрив та інтенсивності внесення поживних речовин урожаєм.

Огляд літератури. Внесення елементів живлення з ґрунту визначають за їх кількістю, яка відчужена з урожаєм основної і нетоварної продукції з одиниці площі, а повернення елементів живлення в ґрунт – за їх кількістю, яка повертається з добривами, надходить із насінним матеріалом, опадами, в процесі фіксації молеку-

лярного азоту з атмосфери тощо [3].

Різниця між надходженням і відчуженням елементів живлення в ґрунті – це баланс елементів живлення. Сільськогосподарські культури характеризуються різною потребою в елементах живлення, різним їх винесенням із ґрунту з урожаєм. З ростом урожаїв збільшується споживання елементів живлення рослинами, тому чим вища запланована врожайність будь-якої культури, тим більше потрібно вносити добрив. Простежується прямий зв'язок між використанням добрив і врожайністю. Країни, які використовують малі норми добрив, мають також низьку врожайність сільськогосподарських культур. Проте слід враховувати, що врожаї від збільшення норм добрив підвищуються прямо пропорційно лише до певного рівня, за якого досягається найвища оплата одиниці добрив виробленою сільськогосподарською продукцією [4].

Отже, основою застосування добрив має бути землеробський закон повернення. У ґрунт мають повертатися елементи живлення, які винесено з урожаєм. Проте цього недостатньо. У ґрунт мають також бути повернені й органічні речовини, що є енергетичним матеріалом для ґрунтових мікроорганізмів, які сприяють повторному використанню елементів живлення та збереженню агрофізичного стану ґрунту.

На практиці причин низької ефективності застосування добрив багато. Насамперед це незбалансованість елементів живлення у певному асортименті добрив, наявність значної кількості кислих ґрунтів, які потребують вапнування, застосування неякісних органічних добрив, нерівномірність внесення добрив, недостатнє технічне забезпечення, іноді низький рівень вмісту в ґрунті рухомих сполук мікроелементів, наявність факторів, які не піддаються або складно піддаються регулюванню – посуха, перезволоження, сонячна радіація та ін. [5].

Тому потрібно створити гнучку систему застосування сучасних технологій з урахуванням особливостей кожного сорту та поля. Вони потребують чіткої відповіді на питання живлення рослин: коли, де, як і в якій формі чи поєднанні застосовувати добрива [6].

В інтенсивному сільськогосподарському виробництві азотні добрива – основний засіб забезпечення рослин азотом. Однією з негативних властивостей цих добрив є їх висока рухомість. Отже, азот мінеральних добрив майже повністю витрачається у рік його внесення. Для підвищення ефективності азотних

добрих слід максимально знизити фізичні втрати азоту та запобігати виділенню в атмосферу його газоподібних сполук, що утворюються в процесі нітрифікації та денітрифікації [7].

На ефективність застосування азотних добрив значно впливають такі фактори: географічні закономірності їх дії; комплекс агрохімічних і меліоративних заходів, які застосовують у сівозміні або під певну культуру; технологія застосування азотних добрив, тобто строки, способи, форми і т. д.; удосконалення форм азотних добрив і застосування інгібіторів нітрифікації; використання найефективніших методів встановлення норм і доз азотних добрив.

Внесення підвищених норм азотних добрив, особливо на ранніх стадіях росту зернових культур, спричиняє вилягання рослин, зниження врожаю і погіршення умов їх збирання. Посилення азотного живлення зернових культур підвищує вміст у рослинах азоту, амінокислот і різних цукрів, що призводить до ушкодження їх попелицями, борошнистою росою та іржею. Тому для зернових, порівняно з іншими культурами, під час визначення норм азотних добрив потрібно ретельніше враховувати ґрунтові і погодні умови, дію попередників та інших агротехнічних факторів.

Упродовж вегетації сільськогосподарські культури мають різні періоди найбільш інтенсивного використання азоту. Тому залежно від біологічних особливостей культур і сортів наближення строків застосування азотних добрив до періоду активного засвоєння азоту рослинами є одним із засобів підвищення ефективності добрив. Цінність різних форм азотних добрив, внесених завчасно до початку використання азоту рослинами, однакова. Ефективність аміачних і нітратних добрив залежить від умов їх використання.

Особливу увагу приділяють підбору форм мінеральних добрив в умовах зрошення, де досить тяжко поєднувати оптимальні режими зрошення та удобрення. Нітратні й аміачно-нітратні азотні добрива вносять у рядки під час сівби в дозі 7-10 кг/га азоту, а також для підживлення (у разі потреби). Підживлення проводять у період найбільшої потреби рослин в азоті. Азотні добрива можна також вносити восени під час зяблевого обробітку ґрунту (за винятком районів з достатнім зволоженням і штучним зрошенням). Азот амонійних добрив добре вбирається ґрунтом, але у разі завчасного внесення за оптимальних умов зволоження і температури ґрунту відбувається його нітрифікація. Нітратний азот, що при цьому

утворюється, вимивається з орного шару ґрунту осінньо-зимовими опадами та зазнає денітрифікації.

Рідкі азотні добрива використовують для основного удобрення та підживлення. Найкраще їх вносити в ґрунт наприкінці березня – на початок травня. Амоній при цьому майже без втрат нітрифікується до кінця червня. За ефективністю рідкі азотні добрива рівноцінні твердим, але вони мають деякі переваги: дають змогу майже повністю механізувати всі роботи при їх застосуванні; вносити разом з мікроелементами, пестицидами, регуляторами росту, поєднувати внесення з іншими агротехнічними заходами, дотримуючись встановлених правил техніки безпеки і гігієни праці. Щоб запобігати газоподібним втратам аміаку, рідкі аміачні добрива вносять на достатню глибину, а амонійні та амідні після поверхневого розбризкування негайно загортають у ґрунт. Ефективним є також пізньоосіннє їх внесення, коли температура ґрунту знижується до 1-5°C і процеси нітрифікації пригнічуються. Більша частина азоту взимку зберігається в ґрунті у формі амонію, що зводить до мінімуму його втрати.

Ефективність азотних добрив можна також підвищити використанням інгібіторів нітрифікації і застосуванням тривалодіючих азотних добрив [8]. Ефективність азотних добрив знаходиться у протилежній залежності від запасів мінерального азоту в кореневмісному шарі ґрунту. Тому всі методи встановлення оптимальних норм азотних добрив, які нині використовують, зводяться до обліку вмісту мінерального азоту в ґрунті перед сівбою або у ранні фази росту й розвитку рослин. Значні труднощі для практичної діагностики мають дуже швидкі, порівняно з іншими елементами мінерального живлення рослин, зміни азотного режиму ґрунту в часі та в просторі.

Зазвичай, загальна кількість азоту (азот, що зберігся в зоні кореневої системи рослин після зими плюс азот, що утвориться в ґрунті під час росту рослин) недостатня для одержання високих урожаїв. Вважається, що через короткий сільськогосподарський сезон, тільки 25-40 % всього азоту, необхідного для формування високого врожаю культур, рослини беруть з ґрунту. Кількість доступного азоту в ґрунті значно впливає на кількість азоту, яку потрібно внести з добривами [9].

Фосфор – один із трьох основних елементів живлення. За об'ємами використання фосфорні добрива посідають друге місце після азотних.

Рослини засвоюють фосфору значно менше, ніж азоту, але він має надзвичайно важливу роль у їх житті. Вміст його в рослинах становить 0,5-1 % сухої речовини, зокрема, на мінеральні сполуки припадає близько 10-15 %, на органічні – 85-90 %. Співвідношення мінеральних і органічних сполук фосфору залежить від віку рослин і загального забезпечення їх фосфором. У молодих рослинах частка органічного фосфору значно більша, ніж у старих.

Мінеральні сполуки фосфору в рослинах представлені фосфатами кальцію, магнію, калію, амонію тощо. Накопичення їх у стеблах рослин є ознакою високої забезпеченості рослин фосфором. Органічні сполуки фосфору – це ефіри фосфорної кислоти. До них належать фосфатиди, фосфопротеїди, фітин, сахарофосфати, нуклеїнові кислоти, нуклеопротеїди, макроергічні та інші сполуки.

Найбільше фосфору міститься в репродуктивних органах, де його у 3-6 разів більше, ніж у вегетативних частинах рослин, що сприяє інтенсивному перебігу процесів синтезу органічних речовин. У насінні має бути достатній запас фосфору для формування кореневої системи, яка почне поглинати його з ґрунту. При цьому рослини краще засвоюють воду і поживні речовини з ґрунту, швидше формують надземну масу. Основну частину фосфору рослини використовують у початковій фазі росту й розвитку, створюючи відповідні його запаси.

Потім фосфор легко переміщується зі старих тканин у молоді, тобто відбувається його реутилізація. У разі підживлення рослин розчином солей фосфору через листки він переміщується в інші органи досить повільно і в невеликій кількості. Тому фосфорне живлення рослин треба забезпечувати через кореневу систему. Цим і пояснюють потребу внесення в рядки 10-15 кг/га д. р. легкорозчинних фосфорних добрив. Негативну дію нестачі фосфору в ранній період неможливо виправити достатнім його надходженням у наступні періоди росту. Рослини залишаються низькорослими, загальмованими у розвитку, пізніше цвітуть і дають низький урожай.

Це пов'язано з тим, що не відбувається поділ клітин унаслідок нестачі фосфору чи інших елементів живлення для утворення додаткового ядра. Отже, на відміну від рослин, які відчують нестачу азоту і мають при цьому скорочений цикл розвитку, рослини за нестачі фосфору фізіологічно молодші. Фосфор поліпшує їх водний режим і значно пом'якшує

дію на них посухи завдяки накопиченню у вузлах кущіння більшої кількості цукрів, сприяє перезимівлі озимих культур і багаторічних трав, підвищує стійкість рослин проти хвороб, зрівноважує дію азотних добрив.

Оптимальне фосфорне живлення рослин стимулює всі процеси, пов'язані із заплідненням квіток, зав'язуванням, формуванням і досяганням плодів. Надлишок фосфору призводить до передчасного розвитку та відмирання листового апарату, раннього досягання плодів, внаслідок чого рослини не встигають сформувати достатній урожай. Нестача фосфору виявляється у затримці росту й розвитку рослин – утворюються дрібні листки, запізнюється цвітіння і досягання плодів. Нижні листки набувають тьмяно-сірого або темно-зеленого відтінку. З часом вони скручуються і передчасно відмирають. Крім того, за нестачі фосфору внаслідок утворення антоціану нерідко виявляються червонуваті та фіолетові відтінки, насамперед на основних стеблах, у пазухах листків, на черешках. Більш виражені ознаки нестачі фосфору спостерігаються на старих і нижніх листках.

В умовах значного фосфорного дефіциту часто спостерігаються ознаки азотного голодування, що пояснюють зменшенням використання азоту для синтезу органічних сполук унаслідок нестачі фосфору. Тому ознаки азотного і фосфорного голодування досить часто збігаються. Фосфор позитивно впливає на підвищення врожайності сільськогосподарських культур. Крім того, він сприяє формуванню високих харчових і технологічних якостей продукції. Оптимальне фосфорне живлення рослин збільшує частку товарної продукції в біологічному врожаї (зерна відносно соломи у зернових).

Проте надлишок фосфору також несприятливий для розвитку рослин. Так, вони містять багато мінеральних фосфатів, зокрема у вегетативних органах, пришвидшується їх вегетація, не встигає сформуватись високий урожай. За надлишку фосфору погіршується живлення рослин цинком, що призводить до захворювання плодів на розетковість.

Поряд з азотом і фосфором калій є основним елементом живлення рослин [10]. У рослинах він знаходиться в іонній формі, тому не входить до складу органічних сполук клітин. Він переважно зосереджений у цитоплазмі та вакуолях. Калій вимивається з рослин дощем, особливо зі старих листків. Молоді органи рослин містять його значно більше, ніж старі. У процесі росту й

розвитку рослин калій переміщується зі старих органів і тканин у молоді органи, що ростуть, де він використовується повторно.

Калій у рослинах бере активну участь у білковому і вуглеводному обміні, активує діяльність ферментів, регулює процеси відкривання і закривання продихів на листках, поглинання вологи кореневою системою, що сприяє раціональному й ефективному використанню води. Тому забезпеченість рослин калієм підвищує їх стійкість проти посухи та несприятливої дії високих і низьких температур.

Нестача калію гальмує деякі біохімічні процеси в рослині, що негативно впливає на обмін речовин. Спочатку молоді рослини жовкнуть, потім буріють і поступово відмирають. Відмирання старіших листків починається з верхівки, поширюється вниз по їх краях, а потім між жилками.

Характерною ознакою калійного голодування є "опіки" країв листків, дрібні іржаві плями на їх пластинках. Рослини в'януть, стебла стають ламкими, що спричинює вилягання зернових культур, гальмується розвиток репродуктивних органів, зерно формується щуплим і має погану схожість. За нестачі калію клітини ростуть нерівномірно, що викликає гофрованість, куполоподібне закручування листків. Менш чутливі – зернові культури, але за гострого його дефіциту вони погано кущаться, міжвузля стебел вкорочується, а листки, переважно нижні, в'януть навіть за достатньої вологості ґрунту. За надмірного калійного живлення рослин спочатку між жилками листків з'являється мозаїка блідих плям, які з часом буріють, і листки опадають. Крім того, за надлишку калію в ґрунті спостерігається магнієве голодування рослин [11, 12].

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Формування балансу біогенних елементів в агроєкосистемах є результатом складної взаємодії природних та антропогенних чинників, серед яких визначальне значення мають агрокліматичні умови, структура землекористування, рівень урожайності сільськогосподарських культур та особливості систем удобрення. В умовах сучасних кліматичних змін, що супроводжуються посиленням процесів аридизації на території Південного Степу України, оцінювання стану кругообігу поживних речовин набуває важливого значення для забезпечення екологічної стійкості агроєкосистем і

збереження родючості ґрунтів. Дослідження просторово-часових особливостей формування балансу біогенних елементів при вирощуванні ярого ячменю дозволяє виявити основні закономірності зміни поживного режиму ґрунтів та оцінити потенційні ризики їх деградації в умовах трансформації клімату та агровиробництва.

Дослідження виконано в межах агроєкологічного підходу до аналізу функціонування агроєкосистем Південного Степу України, який передбачає комплексне врахування взаємозв'язків між кліматичними умовами, структурою сільськогосподарського виробництва, рівнем агротехнологічного забезпечення та процесами трансформації поживного режиму ґрунтів. Особливу увагу приділено оцінюванню інтенсивності кругообігу біогенних елементів у посівах ярого ячменю (*Hordeum vulgare* L.) як однієї з провідних зернових культур регіону, що відіграє важливу роль у структурі виробництва зерна та забезпеченні продовольчої безпеки.

Об'єктом дослідження є процес формування балансу основних біогенних елементів – азоту, фосфору та калію – при вирощуванні ярого ячменю в умовах сучасних змін клімату. Територія дослідження охоплює Одеську, Миколаївську, Херсонську та Запорізьку області, які належать до зони Південного Степу України. Незважаючи на спільність природно-кліматичних умов, зазначені регіони характеризуються певними відмінностями у рівнях аридності клімату, структурі посівних площ, інтенсивності застосування мінеральних добрив та особливостях ведення сільськогосподарського виробництва. Саме ці регіональні особливості створюють передумови для проведення порівняльного аналізу закономірностей формування балансу біогенних елементів.

Для забезпечення репрезентативності результатів використано багаторічний часовий ряд даних за період 2015-2025 рр., що дозволяє врахувати як природну міжрічну мінливість агрокліматичних показників, так і зміни, пов'язані з трансформацією структури посівних площ, технологій вирощування культури та сучасними соціально-економічними умовами функціонування аграрного сектору. У межах дослідження проведено аналіз динаміки посівних площ ярого ячменю, агрокліматичних показників, структури застосування мінеральних добрив та співвідношення між надходженням, винесенням і втратами біогенних елементів.

Інформаційну основу дослідження становили статистичні дані щодо посівних площ ярого ячменю, його врожайності та обсягів внесення мінеральних добрив, агрометеорологічна інформація щодо температурного режиму, атмосферних опадів і дефіциту вологості повітря, а також довідкові нормативи винесення біогенних елементів урожаєм сільськогосподарських культур.

Гідротермічний коефіцієнт Селянінова визначали за формулою:

$$\Gamma TK = \frac{\sum P}{0.1 \sum T}, \quad (1)$$

де $\sum P$ – сума атмосферних опадів за період із середньодобовою температурою повітря понад 10°C , мм; $\sum T$ – сума середньодобових температур повітря понад 10°C .

Показник посушливості Д. І. Шашко визначали за формулою:

$$Md = \frac{\sum P}{\sum d}, \quad (2)$$

де $\sum P$ – сума атмосферних опадів за досліджуваний період, мм;

$\sum T$ – сума середньодобових дефіцитів тиску водяної пари, мб [13, 14, 15].

Питомий винос біогенів елементів із площі, зайнятої ярим ячменем, визначали за формулою:

$$R_i = \alpha_N k_i y_i + \alpha_P k_i y_i + \alpha_K k_i y_i, \quad (3)$$

де R_i – питомий винос біогенних елементів, кг/га; α_N , α_P , α_K – коефіцієнти винесення відповідно азоту, фосфору та калію; k_i – нормативний показник винесення біогенних елементів урожаєм, кг/т; y_i – фактична врожайність культури, т/га.

Для розрахунків використано нормативні коефіцієнти, рекомендовані для ярого ячменю при вирощуванні на чорноземах звичайних. Значення коефіцієнтів становили: $\alpha_N = 0,48$;

$\alpha_P = 0,12$; $\alpha_K = 0,41$.

Нормативний винос поживних речовин урожаєм ярого ячменю приймали на рівні 30,4 кг N, 11,4 кг P_2O_5 , 22,0 кг K_2O на 1 т продукції. Застосування зазначених нормативів забезпечило можливість уніфікованого порівняння балансових показників між регіонами дослідження.

Вхідну складову балансу біогенних елементів визначали за фактичними обсягами внесення мінеральних добрив.

Кількість біогенних елементів, що надходять до ґрунту з мінеральними добривами, визначали за формулою:

$$W_{ВНХ} = \sum_{j=1}^m \Phi_{M_j} W_{CP_j}, \quad (4)$$

де $W_{ВНХ}$ – кількість біогенних елементів, що надходять до ґрунту з мінеральними добривами, кг/рік; m – кількість видів добрив; Φ_{M_j} – фізична маса j -го виду добрив, т; W_{CP_j} – середній вміст діючої речовини в добриві j -го виду.

Фізичну масу добрив визначали за формулою:

$$\Phi_{M_j} = \sum_{j=1}^m S_j N_j, \quad (5)$$

де S_j – площа внесення добрива, га; N_j – норма внесення добрива, т/га.

Втрати біогенних елементів визначали за формулою:

$$\sum W_{ПОТ} = \sum_{j=1}^m W_{ВНХ_j} q_j. \quad (6)$$

де $W_{ПОТ}$ – втрати біогенних елементів, кг; q_j – частка втрат біогенних елементів унаслідок порушення технології внесення добрив; $W_{ВНХ}$ – кількість біогенних елементів, внесених із добривами j -го виду, кг/рік [16, 17].

Баланс біогенних елементів визначали шляхом порівняння їх надходження до агроєкосистеми з обсягами винесення урожаєм та втратами внаслідок технологічних і природних процесів. Додатні значення балансу свідчили про накопичення поживних речовин у ґрунті, тоді як від'ємні характеризували формування дефіцитного режиму живлення та поступове виснаження ґрунтових ресурсів. Отримані результати використано для оцінювання сучасного стану кругообігу біогенних елементів в агроєкосистемах Південного Степу України та визначення основних тенденцій його змін в умовах сучасних кліматичних трансформацій.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз функціонування агроєкосистем Південного Степу України у період 2015-2025 рр. виконано з позицій системного підходу до оцінювання взаємодії агрокліматичних умов, структури землекористування та балансу основних біогенних елементів (N, P, K) у посівах ярого ячменю.

Оцінка просторово-часової трансформації посівних площ ярого ячменю (рис. 1) засвідчує стійку тенденцію до їх скорочення в усіх досліджуваних регіонах. *Дані 2022-2024 років наведені Держстатом з урахуванням обмежень воєнного стану та без повного охоплення тимчасово окупованих територій. **2025 –

попередні посівні площі під урожай 2025 року.

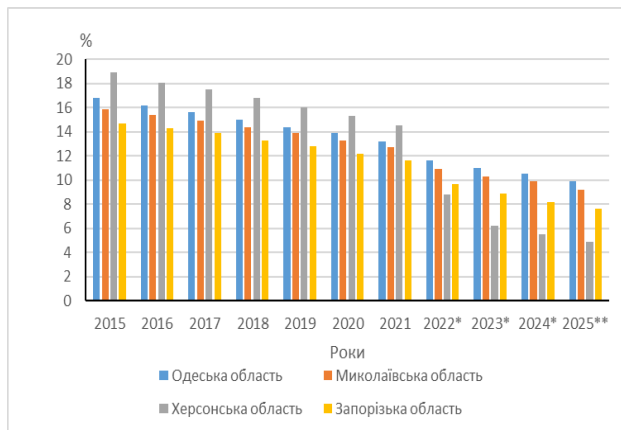


Рис. 1 – Регіональні особливості структури посівних площ ярого ячменю в умовах Південного Степу України

Fig. 1 – Regional characteristics of the distribution of spring barley acreage in the Southern Steppe of Ukraine

Результати аналізу динаміки посівних площ ярого ячменю свідчать про наявність довготривалої тенденції до скорочення площ вирощування культури в усіх досліджуваних областях. Встановлена тенденція є наслідком одночасного впливу економічних, агротехнологічних та кліматичних чинників, які визначають структуру сучасного землекористування в регіоні.

В Одеській та Миколаївській областях зменшення посівних площ відбувалося поступово, що може бути пов'язано зі зміною структури посівів на користь більш рентабельних культур, а також із необхідністю адаптації сільськогосподарського виробництва до дефіциту ґрунтової вологи. Незважаючи на скорочення площ вирощування, ярий ячмінь продовжує залишатися важливою складовою зернового клину регіону.

Найбільш суттєві зміни зафіксовані в Херсонській області. Починаючи з 2022 року спостерігається різке скорочення посівних площ, що пов'язано зі значними порушеннями функціонування аграрного сектору, обмеженням доступу до земельних ресурсів та руйнуванням елементів меліоративної інфраструктури. Внаслідок цього регіон втратив значну частину виробничого потенціалу щодо вирощування ярого ячменю.

У Запорізькій області також простежується стійке зменшення площ посіву культури, що супроводжується підвищенням ризиків нестабільного виробництва внаслідок посилення дефіциту вологи та зростання частоти несприятливих погодних явищ. Отримані

результати свідчать про трансформацію структури землекористування в межах Південного Степу України та необхідність врахування цих змін під час оцінювання балансу біогенних елементів.

Отримані результати свідчать (рис. 2-5), що протягом досліджуваного періоду агрокліматичні умови території Південного Степу України характеризувалися значною міжрічною мінливістю показників зволоження. Коливання значень гідротермічного коефіцієнта Селянінова та показника посушливості Д. І. Шашко відображають нестабільність співвідношення між тепловими ресурсами та атмосферним зволоженням, що безпосередньо впливає на ефективність функціонування агроєкосистем і формування врожайності ярого ячменю.

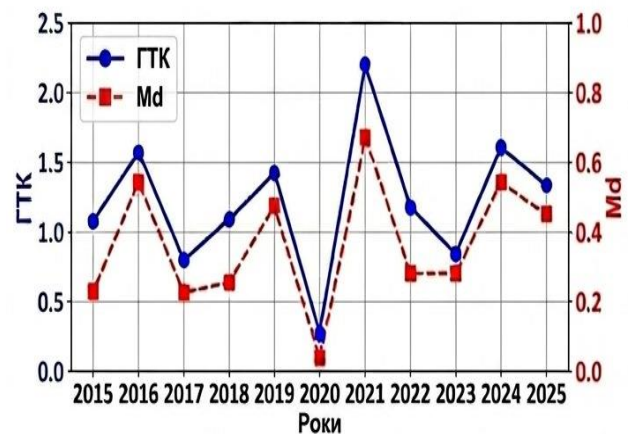


Рис. 2 – Динаміка гідротермічного коефіцієнта та показника посушливості в Одеській області

Fig. 2 – Dynamics of the Hydrothermal Coefficient and Aridity Index in Odessa region

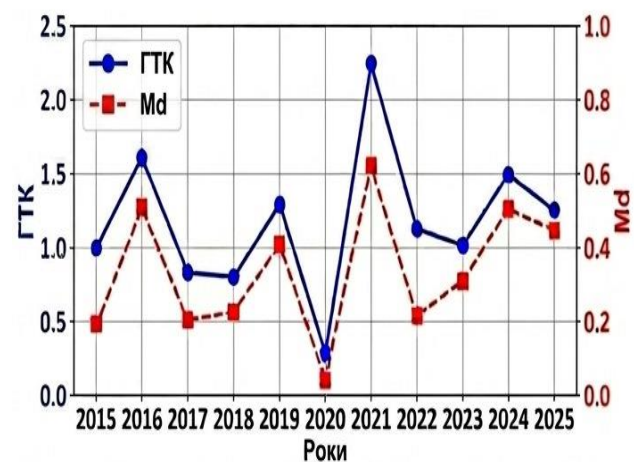


Рис. 3 – Динаміка гідротермічного коефіцієнта та показника посушливості в Миколаївській області

Fig. 3 – Dynamics of the Hydrothermal Coefficient and Aridity Index in Mykolaiv region

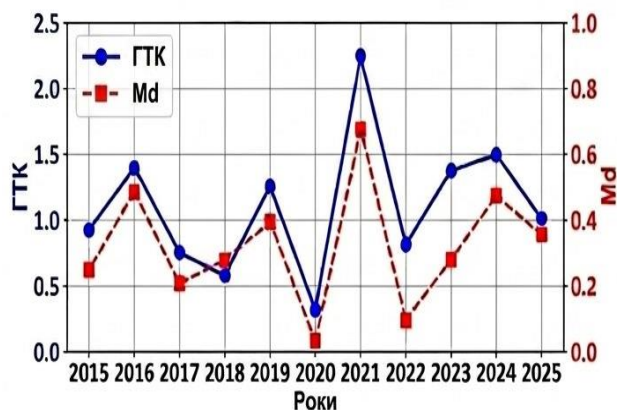


Рис. 4 – Динаміка гідротермічного коефіцієнта та показника посушливості в Херсонській області

Fig. 4 – Dynamics of the Hydrothermal Coefficient and Aridity Index in Kherson region

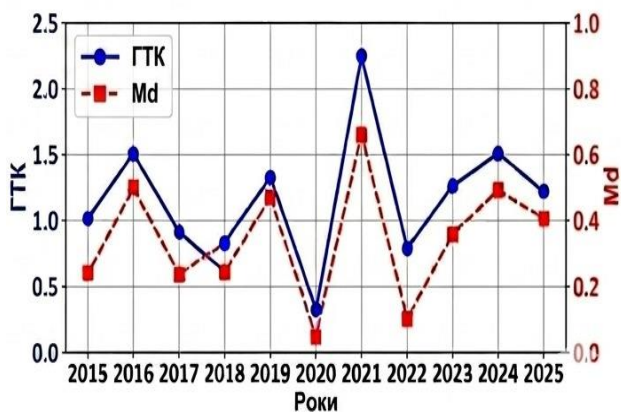


Рис. 5 – Динаміка гідротермічного коефіцієнта та показника посушливості в Запорізькій області

Fig. 5 – Dynamics of the Hydrothermal Coefficient and Aridity Index in Zaporizhzhia region

Для Одеської області характерною є відносно помірна варіабельність показників ГТК та Md порівняно з іншими регіонами дослідження. Незважаючи на окремі роки з дефіцитом атмосферної вологості, агрокліматичні умови залишалися відносно сприятливими для формування врожаю ярого ячменю. Разом із тим навіть у межах цього регіону спостерігається поступове збільшення частоти років із проявами посушливості, що узгоджується із сучасними тенденціями зміни клімату.

У Миколаївській області коливання показників вологозабезпечення мають більш виражений характер. Періоди недостатнього зволоження чергуються з відносно сприятливими роками, що створює нестабільні умови для формування продуктивності посівів. За таких умов ефективність використання поживних речовин значною мірою визначається особливостями погодних умов конкретного

вегетативного періоду.

Найбільш несприятлива ситуація спостерігається в Херсонській та Запорізькій областях. У цих регіонах упродовж більшості років дослідження фіксуються низькі значення гідротермічного коефіцієнта та підвищені значення показника посушливості. Такі умови свідчать про формування стійкого дефіциту продуктивної вологості, який суттєво обмежує інтенсивність ростових процесів та погіршує засвоєння елементів живлення.

Відомо, що за умови недостатнього зволоження знижується інтенсивність масоперенесення поживних речовин до кореневої системи, погіршується доступність фосфору, обмежується засвоєння азоту та зменшується ефективність використання калію. У результаті навіть за наявності достатньої кількості поживних речовин у ґрунті рослини не можуть повною мірою реалізувати свій продуктивний потенціал.

Таким чином, виявлені зміни агрокліматичних умов слід розглядати як один із ключових чинників формування сучасного балансу біогенних елементів у посівах ярого ячменю. Посилення аридності клімату створює додаткові обмеження для ефективного використання добрив та підвищує ризики виснаження поживного режиму ґрунтів у довгостроковій перспективі.

Аналіз багаторічної динаміки застосування мінеральних добрив (рис. 6-9) свідчить про наявність суттєвих регіональних відмінностей у рівнях агрохімічного забезпечення посівів ярого ячменю. В усіх досліджуваних областях переважають азотні добрива, що відображає прагнення товаровиробників забезпечити швидкий приріст урожайності шляхом інтенсифікації азотного живлення рослин.

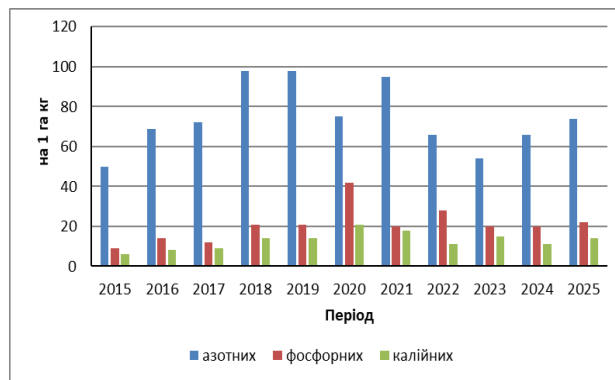


Рис. 6 – Внесення мінеральних добрив в Одеській області

Fig. 6 – Application of mineral fertilizers in Odessa region

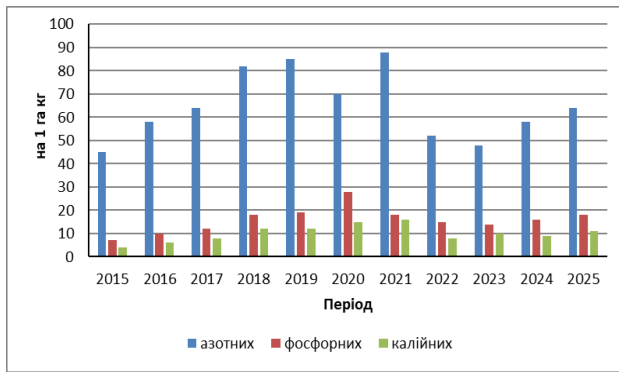


Рис. 7 - Внесення мінеральних добрив у Миколаївській області

Fig. 7 - Application of mineral fertilizers in Mykolaiv region

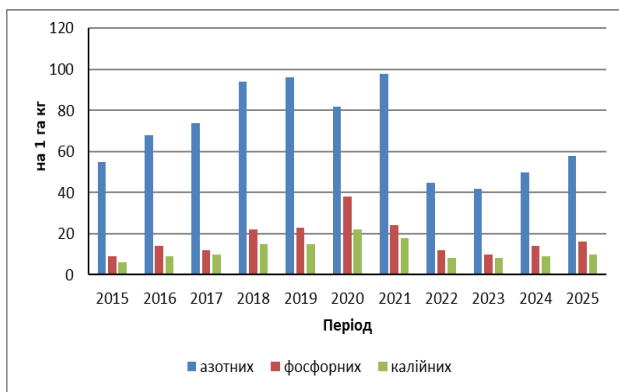


Рис. 8 – Внесення мінеральних добрив у Херсонській області

Fig. 8 – Application of mineral fertilizers in Kherson region

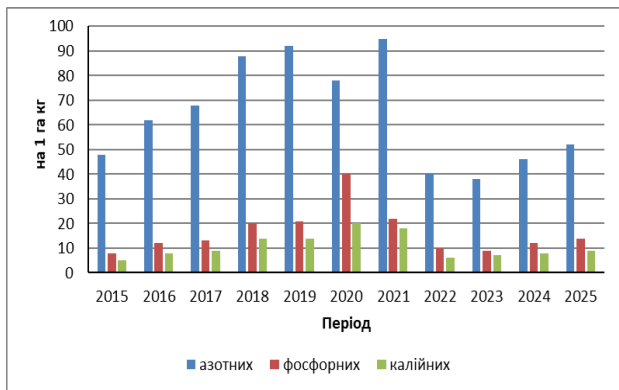


Рис. 9 – Внесення мінеральних добрив у Запорізькій області

Fig. 9 – Application of mineral fertilizers in Zaporizhzhia region

Разом із тим структура внесення добрив характеризується недостатнім рівнем використання фосфорних і особливо калійних добрив. Така ситуація є характерною для значної частини агроєкосистем України та призводить до поступового порушення оптимального співвідношення між основними елементами.

В Одеській області рівень застосування добрив залишається відносно стабільним, що певною мірою забезпечує підтримання продуктивності агроєкосистем. У Миколаївській області також спостерігається достатньо рівномірна динаміка внесення добрив, хоча загальні обсяги їх використання поступаються показникам окремих років досліджуваного періоду.

Для Херсонської області характерне різке скорочення внесення добрив після 2021 року. Зменшення інтенсивності агрохімічних заходів суттєво послаблює можливості компенсації винесення поживних речовин урожаєм та створює передумови для прискореного виснаження ґрунтовими ресурсами.

У Запорізькій області спостерігаються найнижчі показники застосування добрив серед усіх регіонів дослідження. Поєднання низького рівня удобрення та несприятливих агрокліматичних умов формує додаткові ризики зниження родючості ґрунтів і погіршення продуктивності агроєкосистем.

Важливо відзначити, що домінування азотних добрив за обмеженого внесення фосфору та калію може спричиняти порушення збалансованості живлення рослин. У таких умовах підвищується ймовірність формування прихованого дефіциту окремих елементів, знижується коефіцієнт використання поживних речовин і погіршується екологічна стійкість агроєкосистем.

Отримані результати свідчать про необхідність переходу до більш збалансованих систем удобрення, які забезпечуватимуть не лише короткострокове підвищення врожайності, а й довгострокове відтворення родючості ґрунтів.

Результати оцінювання балансу біогенних елементів (рис. 10-13) дозволяють більш повно охарактеризувати сучасний стан агроєкосистем Південного Степу України та визначити основні тенденції зміни їхнього поживного режиму.

Аналіз співвідношення між надходженням, винесенням і втратами поживних речовин свідчить про формування дефіцитного типу балансу в усіх без винятку регіонах дослідження.

Встановлено, що впродовж більшості років досліджуваного періоду величини питомого винесення біогенних елементів урожаєм перевищували їх надходження до агроєкосистем із мінеральними добривами. Така закономірність характерна як для азоту, так і для фосфору та калію, що свідчить про системний характер виснаження поживного режиму ґрунтів.

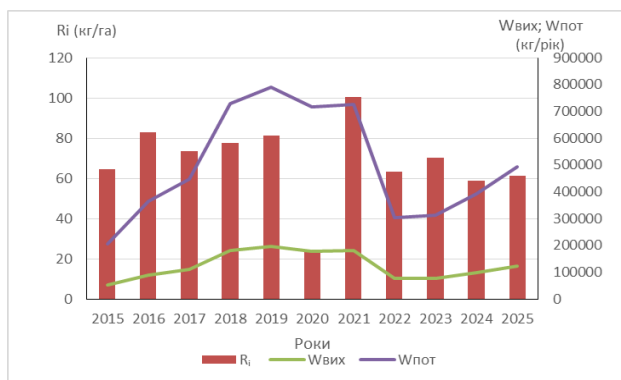


Рис. 10 – Динаміка питомого виносу, внесення та втрат біогенних елементів в Одеській області

Fig. 10 – Dynamics of specific removal, application, and losses of biogenic elements in Odesa region

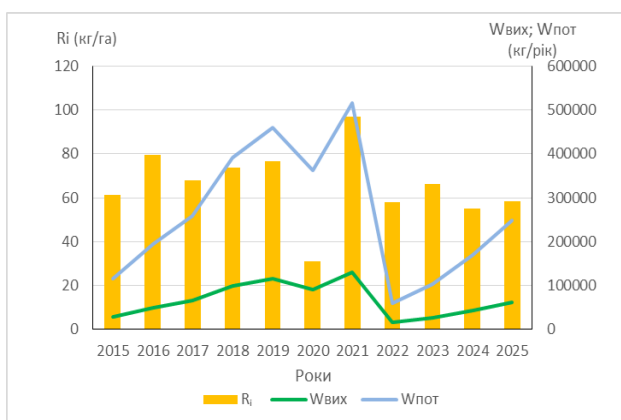


Рис. 11 – Динаміка питомого виносу, внесення та втрат біогенних елементів у Миколаївській області

Fig. 11 – Dynamics of specific removal, application, and losses of biogenic elements in Mykolaiv region

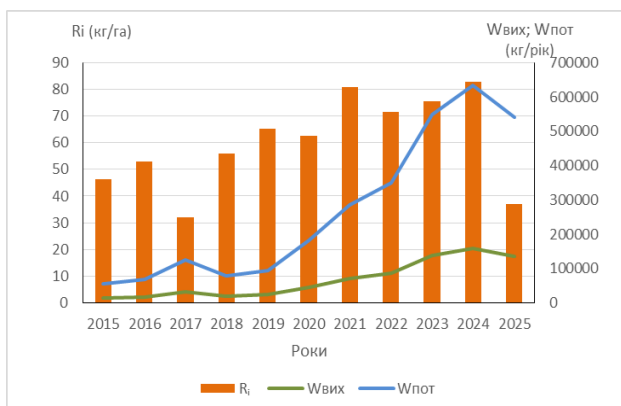


Рис. 12 – Динаміка питомого виносу, внесення та втрат біогенних елементів у Херсонській області

Fig. 12 – Dynamics of specific removal, application, and losses of biogenic elements in Kherson region

Особливої уваги заслуговує ситуація щодо азоту. Незважаючи на переважання азотних добрив у структурі удобрення, рівень компенсації виносу азоту залишається недостатнім. Додатковим фактором виступають

втрати азоту внаслідок процесів вимивання, денітрифікації та газоподібного виносу, які посилюються під впливом несприятливих погодних умов.

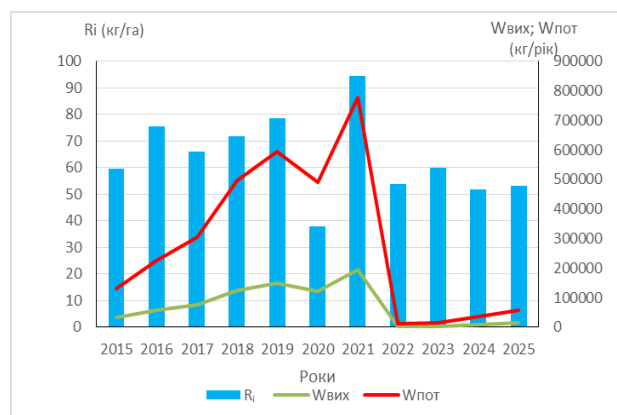


Рис. 13 – Динаміка питомого виносу, внесення та втрат біогенних елементів у Запорізькій області

Fig. 13 – Dynamics of specific removal, application, and losses of biogenic elements in Zaporizhzhia region

Для фосфору характерним є ще більш виражений дефіцит компенсації. Обмежене застосування фосфорних добрив у поєднанні з постійним виносом фосфору врожаєм поступово призводить до зменшення його запасів у ґрунті. У довгостроковій перспективі це зможе негативно позначитися на розвитку кореневої системи рослин та ефективності використання ними вологи.

Ситуація з калієм також викликає занепокоєння. Незважаючи на відносно нижчу інтенсивність його виносу порівняно з азотом, низькі обсяги застосування калійних добрив не забезпечують повноцінного відновлення втрат цього елемента. Це особливо важливо для умов Південного Степу України, де калій відіграє важливу роль у підвищенні посухостійкості рослин.

Порівняльний аналіз регіонів показав, що найбільш несприятлива ситуація склалася в Херсонській та Запорізькій областях. Саме тут спостерігається поєднання низьких рівнів удобрення, високої посушливості та значних ризиків деградації ґрунтових ресурсів. В Одеській та Миколаївській областях показники балансу є дещо кращими, проте також залишаються від'ємними протягом більшості років дослідження.

Отримані результати узгоджуються з сучасними науковими уявленнями щодо зростання асиметрії потоків поживних речовин в агроєкосистемах України та підтверджують наявність тенденцій до поступового виснаження

грунтового покриву. За відсутності компенсаційних заходів така ситуація може призвести до подальшого зниження продуктивності агроландшафтів та погіршення екологічної стійкості сільськогосподарського виробництва.

Таким чином, результати проведеного дослідження свідчать, що баланс біогенних елементів може розглядатися як інтегральний показник сучасного стану агроєкосистем Південного Степу України. Його використання дозволяє не лише оцінювати ефективність систем удобрення, але й прогнозувати можливі зміни родючості ґрунтів у майбутньому.

4. ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження виконано комплексне оцінювання особливостей формування балансу основних біогенних елементів (азоту, фосфору та калію) в агроєкосистемах Південного Степу України при вирощуванні ярого ячменю впродовж 2015-2025 рр. на основі аналізу агрокліматичних умов, структури посівних площ, рівня застосування мінеральних добрив та інтенсивності вивезення поживних речовин урожаєм. Встановлено наявність стійкої тенденції до скорочення площ вирощування ярого ячменю в Херсонській області, де після 2021 року відбулося різке зменшення площ посіву культури. Виявлені зміни свідчать про трансформацію структури агровиробництва та посилення впливу зовнішніх чинників на функціонування агроєкосистем регіону. За результатами аналізу гідротермічного коефіцієнта Селянінова та показника посушливості Д. І. Шашко встановлено посилення процесів аридизації клімату на території Південного Степу України. Найбільш несприятливі умови вологозабезпечення сформувалися в Херсонській та Запорізькій областях, де впродовж досліджуваного періоду спостерігалися знижені значення гідротермічного коефіцієнта та підвищені значення показника посушливості. Встановлено, що дефіцит атмосферної вологи є одним із визначальних чинників зниження ефективності використання поживних речовин рослинами ярого ячменю.

Проведений аналіз структури застосування мінеральних добрив показав наявність дисбалансу в системах удобрення досліджуваних регіонів. В усіх областях домінували азотні добрива, тоді як обсяги внесення фосфорних і калійних добрив залишалися недостатніми для

забезпечення збалансованого відтворення поживного режиму ґрунтів. Найнижчі рівні удобрення встановлено в Запорізькій області, а найбільш суттєве скорочення внесення добрив після 2021 року спостерігалось в Херсонській області. Результати балансових розрахунків свідчать про формування стійкого від'ємного балансу азоту, фосфору та калію в усіх досліджуваних регіонах. Встановлено, що величини питомого вивезення біогенних елементів урожаєм систематично перевищують їх надходження з мінеральними добривами, що призводить до поступового виснаження запасів поживних речовин у ґрунті. Найбільш критична ситуація характерна для Херсонської та Запорізької областей, де негативний вплив недостатнього удобрення посилюється несприятливими агрокліматичними умовами. Встановлено, що поєднання кліматичної аридизації, скорочення обсягів внесення добрив та недостатньої компенсації вивезення поживних речовин формує довгострокові передумови для погіршення агрохімічного стану ґрунтів, зниження ефективності використання мінерального живлення та послаблення екологічної стійкості агроєкосистем Південного Степу України.

Отримані результати підтверджують необхідність удосконалення регіональних систем удобрення з урахуванням сучасних агрокліматичних умов, забезпечення збалансованого відтворення біогенних елементів у ґрунті та впровадження адаптаційних заходів, спрямованих на збереження родючості ґрунтів і підтримання стабільності функціонування агроєкосистем в умовах подальших кліматичних змін.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гирка А. Д., Ткаліч І. Д., Сидоренко Ю. Я., Бочевар О. В. Особливості формування зернової продукції ячменю ярого залежно від доз позакореневого підживлення і строків його проведення. *Зернові культури*. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0135>
2. Gamayunova V., Kasatkina T. Influence of spring barley nutrition optimization on grain quality formation in the Southern Steppe of Ukraine. *Scientific horizons*. 2019. Vol. 22, No. 10. P. 3-12. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2019-83-10-3-12>
3. Pavlo Nikitin, Valentina Ilna. Studying the needs of barley for external environmental factors in the conditions of Southern Ukraine to justify reclamation. *Third International Scientific Conference GIRR 2025: Global Challenges Through the Prism of Rural Development in the Sector of Agriculture and Tourism* 9th May, 2025. Sabak, Serbia. (str. 75–82). <https://doi.org/10.46793/GIRR25.077N>

4. Pavlo Nikitin, Valentina Ilina. Modeling the impact of moisture on the uptake of biogenic elements by spring barley plants in the conditions of Southern Ukraine. *Third International Scientific Conference GIRR 2025: Global Challenges Through the Prism of Rural Development in the Sector of Agriculture and Tourism* 9th May, 2025. Sabak, Serbia. (str. 137-144). <https://doi.org/10.46793/GIRR25.140N>
5. Панфілова, А. В., Гамаюнова, В. В. The productivity of spring barley varieties and plant nutrition optimization in the Southern Steppe of Ukraine. *Plant Varieties Studying and Protection*. 2018, Vol. 14, No. 3, P. 310-315. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.14.3.2018.145304>
6. Baklanova T., Gamayunova V., Khonenko L. Spring barley grain yield when grown in the conditions of southern Ukraine with elements of biologization and preservation of soil fertility. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2026. Vol. 27, No. 2. P. 60-70. <https://doi.org/10.12912/27197050/216645>
7. Ceclan A., Simon A., Russu F., Bardas M., Chetan F., Popa A. The influence of nitrogen, and potassium fertilizers on spring barley production and harvest increase. *Life Science and Sustainable Development-Journal*. 2022. Vol. 3, No. 2, P. 60-66. <https://doi.org/10.58509/xsvm6b90>
8. Gamayunova V., Panfilova A., Baklanova T., Kuvshinova A., Kasatkina T., Nagirniy V. The increase of grain production in Ukrainian Steppe area by means of barley cultivation and its nutrition optimisation. *Scientific horizons*. 2020. 02(87). P. 15-23. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-87-02-15-23>
9. Karabach K. S., Berezhniak E. M. Influence of fertiliser systems with elements of biologisation and cultivation on the yield, economic and energy efficiency of spring barley. *Plant and Soil Science*. 2021. Vol. 12, No. 2. P. 61-68. <https://doi.org/10.31548/agr2021.02.0060>
10. Горобець М. В., Писаренко П. В., Чайка Т. О., Міщенко О. В., Крикунова В. Ю. Вплив регуляторів росту рослин на онтогенез сортів ячменю ярого. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2021. № 1. С. 106–115. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.01.12>
11. Medinets S., Oenema O., Spears B.M. et al. Nutrient asymmetry challenges the sustainability of Ukrainian agriculture. *Communications Earth & Environment*. 2025. Vol. 6, No. 645. P. 1-12. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02826-9>
12. Господаренко Г. М. Агрохімія: підручник. Київ: Аграрна освіта, 2013. – 406 с.
13. Польовий А. М. Сільськогосподарська метеорологія: підручник. Одеса: ТЕС, 2012. – 629 с.
14. Адаменко Т. І. Агрокліматичне зонування території України з врахуванням змін клімату. Київ: ТОВ «РІА» БЛПЦ, 2014. 18 с.
15. Польовий А. М., Овчарук В. А., Вольвач О. В., Кущенко Л. В., Толмачова А. В. Агрокліматична оцінка посушливості вегетаційного періоду в Причорноморській зоні надзвичайно низької водності. *Екологічні науки. Науково-практичний журнал*. 2021. Вип. 6(39), С. 158-165. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.27>
16. Полетаєва Л.М., Юрасов С.М., Ільїна В.Г. Моделювання та прогнозування стану довкілля: конспект лекцій. Одеса: Дніпропетровськ: «Економіка», 2005. – 179 с.
17. Полетаєва Л.М., Юрасов С.М., Ільїна В.Г., Чернякова О.І. та ін. Моделювання та прогнозування стану довкілля: збірник методичних вказівок до практичних робіт. Одеса: ОДЕКУ, 2006. 140 с.

REFERENCES

1. Hyrka, A.D., Tkalic, I.D., Sydorenko, Yu.Ya., Bochevar, O.V. (2020). Osoblyvosti formuvannya zernovoi produktsii yachmeniu yaroho zalezno vid doz pozakorenevoho pidzhyvlennia i strokiv yoho provedennia [Peculiarities of formation of spring barley grain production depending on the doses of foliar feeding and the timing of its implementation]. *Zernovi kultury*, 4(2), pp. 272–280. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0135> (in Ukr.)
2. Gamayunova, V., Kasatkina, T. (2019). Influence of spring barley nutrition optimization on grain quality formation in the Southern Steppe of Ukraine. *Scientific horizons*, 22(10), pp. 3-12. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2019-83-10-3-12>
3. Nikitin, P., Ilina, V. (2025). Studying the needs of barley for external environmental factors in the conditions of Southern Ukraine to justify reclamation. *Third International Scientific Conference GIRR 2025: Global Challenges Through the Prism of Rural Development in the Sector of Agriculture and Tourism*, Sabak, Serbia, pp. 75–82. <https://doi.org/10.46793/GIRR25.077N>
4. Nikitin, P., Ilina, V. (2025). Modeling the impact of moisture on the uptake of biogenic elements by spring barley plants in the conditions of Southern Ukraine. *Third International Scientific Conference GIRR 2025: Global Challenges Through the Prism of Rural Development in the Sector of Agriculture and Tourism*, Sabak, Serbia, pp. 137–144. <https://doi.org/10.46793/GIRR25.140N>
5. Panfilova, A.V., Gamayunova, V.V. (2018). The productivity of spring barley varieties and plant nutrition optimization in the Southern Steppe of Ukraine. *Plant Varieties Studying and Protection*, 14(3), pp. 310-315. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.14.3.2018.145304>
6. Baklanova, T., Gamayunova, V., Khonenko, L. (2026). Spring barley grain yield when grown in the conditions of southern Ukraine with elements of biologization and preservation of soil fertility. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 27(2), pp. 60-70. <https://doi.org/10.12912/27197050/216645>
7. Ceclan, A., Simon, A., Russu, F., Bardas, M., Chetan, F., Popa, A. (2022). The influence of nitrogen, and potassium fertilizers on spring barley production and harvest increase. *Life Science and Sustainable Development-Journal*, 3(2), pp. 60-66. <https://doi.org/10.58509/xsvm6b90>
8. Gamayunova, V. et al. (2020). The increase of grain production in Ukrainian Steppe area by means of barley cultivation and its nutrition optimisation. *Scientific horizons*, 02(87), pp. 15-23. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-87-02-15-23>
9. Karabach, K.S., Berezhniak, E.M. (2021). Influence of fertiliser systems with elements of biologisation and cultivation on the yield, economic and energy efficiency of spring barley. *Plant and Soil Science*, 12(2), pp. 61-68. <https://doi.org/10.31548/agr2021.02.0060>
10. Horobets, M.V. et al. (2021). Vplyv rehuliatoriv rost Horobets, M.V., Pysarenko, P.V., Chaika, T.O., Mishchenko, O.V., Krykunova, V.Yu. (2021). Vplyv rehuliatoriv rostu roslin na ontogenez sortiv yachmeniu yaroho [Influence of plant growth regulators on the ontogenesis of spring barley varieties]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, 1, pp. 106–115. (in Ukr.) <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.01.12>
11. Medinets, S. et al. (2025). Nutrient asymmetry challenges the sustainability of Ukrainian agriculture. *Communications Earth & Environment*, 6(645), pp. 1-12.

- <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02826-9>
12. Hospodarenko, H.M. (2013). *Ahrokhimiia* [Agrochemistry]: pidruchnyk. Kyiv: Ahrarna osvita, 406 p. (in Ukr.)
 13. Polevoy, A.M. (2012). *Silskohospodarska meteorolohiia* [Agricultural meteorology]: pidruchnyk. Odesa: TES, 629 p. (in Ukr.)
 14. Adamenko, T.I. (2014). *Ahroklimatechnye zonuvannia terytorii Ukrainy z vrakhuvanniam zmin klimatu* [Agroclimatic zoning of the territory of Ukraine taking into account climate change]. Kyiv: TOV «RIA» BLITS, 18 p. (in Ukr.)
 15. Polevoy, A.M., Ovcharuk, V.A., Volvach, O.V., Kushchenko, L.V., Tolmachova, A.V. (2021). *Ahroklimatechna otsinka posushlyvosti vehetatsiinoho periodu v Prychornomorskii zoni nadzvychaino nyzkoi vodnosti* [Agroclimatic assessment of drought during the growing season in the Black Sea zone of extremely low water availability]. *Ekolohichni nauky. Naukovo-praktychnyi zhurnal*, 6(39), pp. 158–165. (in Ukr.)
<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.27>
 16. Poletaieva, L.M. et al. (2006). *Modeliuvannia ta prohnozuvannia stanu dovkillia: zbirnyk metodychnykh vkazivok do praktychnykh robit* [Modeling and forecasting the state of the environment: a collection of methodical instructions for practical work]. Odesa: ODEKU. 140 p. (in Ukr.)
 17. Poletaieva, L.M., Yurasov, S.M., Ilina, V.H. (2005). *Modeliuvannia ta prohnozuvannia stanu dovkillia: konspekt leksii* [Modeling and forecasting the state of the environment: lecture notes]. Odesa-Dnipropetrovsk: Ekonomika. 179 p. (in Ukr.)

ASSESSMENT OF THE BALANCE OF BIOGENIC ELEMENTS IN THE SOUTHERN REGIONS OF UKRAINE UNDER CURRENT CONDITIONS OF SPRING BARLEY CULTIVATION

P. S. Nikitin, V.G. Ilina

*Odesa I.I. Mechnikov National University,
2, V. Zmiiienka Str., 65082 Odesa, Ukraine, agroecology87@gmail.com.
<https://orcid.org/0009-0004-5755-4116>, <https://orcid.org/0000-0001-5781-701X>*

The paper presents the results of a comprehensive assessment of the balance of biogenic elements in the agroecosystems of the Southern Steppe of Ukraine under current spring barley cultivation conditions. The aim of the study was to identify the patterns of nitrogen, phosphorus and potassium balance formation under the influence of agrometeorological changes, transformation of crop acreage structure and mineral fertilizer application during 2015–2025 within Odesa, Mykolaiv, Kherson and Zaporizhzhia regions.

The study was based on the balance method for assessing biogenic elements, statistical analysis of crop acreage, spring barley yield and fertilizer application data, as well as agrometeorological analysis using the Selyaninov hydrothermal coefficient and the D. I. Shashko aridity index. Spatial and temporal changes in agroclimatic conditions, dynamics of cultivated areas, fertilizer use patterns and the relationship between nutrient inputs, removal and losses were evaluated.

A persistent trend towards a reduction in spring barley acreage was identified in all studied regions, with the most pronounced decline observed in Kherson region. The results revealed an intensification of climate aridization manifested by decreasing hydrothermal coefficient values and increasing aridity index values. The most unfavorable moisture conditions were found in Kherson and Zaporizhzhia regions, where the combination of atmospheric moisture deficit and elevated temperatures limits the efficiency of nutrient uptake by plants.

The dominance of nitrogen fertilizers and insufficient application of phosphorus and potassium fertilizers were established. Significant regional differences in fertilizer use were identified, together with a decline in fertilizer application rates in some regions after 2021. The balance calculations demonstrated that nutrient removal by harvest consistently exceeded nutrient inputs from fertilizers, resulting in a stable negative balance of nitrogen, phosphorus and potassium throughout all studied regions.

The obtained results indicate increasing risks of soil resource depletion in the agroecosystems of the Southern Steppe of Ukraine under ongoing climate change and insufficient compensation of nutrient removal. The findings may be used for improving fertilization systems, assessing agroecosystem sustainability and forecasting future changes in soil fertility under further climatic transformations.

Keywords: spring barley; biogenic element balance; nitrogen; phosphorus; potassium; hydrothermal coefficient; aridity; Southern Steppe of Ukraine.

*Подання до редакції : 16. 02. 2026
Надходження остаточної версії : 20. 04. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026*

UDC: 551.586:634.1/.7:551.524.37(477.87)

АГРОКЛІМАТИЧНА ОЦІНКА РИЗИКУ ВЕСНЯНИХ ЗАМОРОЗКІВ ДЛЯ ПЛОДОВИХ КУЛЬТУР НА ЗАКАРПАТТІ В УМОВАХ СУЧАСНОЇ ЗМІНИ КЛІМАТУ

О.В. Куклишин, О.В. Вольвач

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
вул. Змієнка Всеволода, 2, 65082, Одеса, Україна, kuklishyn.oksana@stud.onu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0005-9793-8285>, <https://orcid.org/0000-0002-6650-758X>

Це дослідження присвячене актуальній проблемі адаптації промислового садівництва до умов трансформації кліматичного режиму в Закарпатській області. Робота фокусується на аналізі ризиків, що виникають через весняні заморозки інтенсивністю до -2°C , які є критичними для плодівих дерев у фазі цвітіння. Дослідження охоплює довготривалий період спостережень з 2001 по 2025 роки, що дозволило виявити стійкі тенденції у зміні термічного режиму регіону.

Встановлено, що глобальне потепління спричиняє парадоксальну ситуацію для садівництва Закарпаття. З одного боку, спостерігається зростання суми активних температур, а з іншого - стабільно висока повторюваність пізніх весняних заморозків. Дослідження показало, що терміни настання фази цвітіння у зерняткових та кісточкових культур зміщуються на більш ранні дати. Водночас дати останніх весняних заморозків не демонструють пропорційного зміщення в бік початку весни. Це призводить до критичного скорочення фенологічного інтервалу безпеки, під яким ми розуміємо часовий проміжок між останнім критичним зниженням температури та початком масового цвітіння.

Виявлено значну просторову диференціацію агрокліматичних ризиків залежно від висоти над рівнем моря та особливостей рельєфу. Найбільш загрозлива ситуація характерна для гірських районів, зокрема за даними метеорологічної станції Нижні Ворота, де амплітуда коливань інтервалу безпеки є максимальною. Дослідження дозволило нам оцінити вплив потепління на окремі види культур. Ми встановили, що абрикос є найбільш вразливою культурою, оскільки фаза його цвітіння у більшості досліджених років повністю збігається з періодом ймовірних заморозків. Порівняльний аналіз показав, що найбільш адаптованою до сучасних умов є яблуня, яка завдяки пізнішим термінам вегетації зберігає стабільніший інтервал безпеки. Натомість слива та черешня демонструють тенденцію до зближення дат цвітіння з датами останніх заморозків, що дедалі частіше призводить до потрапляння цих культур у «заморозкову пастку» та повної або часткової втрати врожаю.

Отримані результати дозволили охарактеризувати закономірності деградації часового ресурсу безпечного розвитку садівництва. Доведено, що для мінімізації втрат врожаю необхідно переглянути стратегію розміщення садів та впроваджувати активні методи захисту, такі як системи штучного туманоутворення та вітрові машини. Результати роботи підтверджують гіпотезу про необхідність мікрокліматичного районування територій для ефективного ведення високоризикового агровиробництва.

Ключові слова: весняні заморозки, фенологія цвітіння, плодіві культури, Закарпаття, зміна клімату, агрокліматичні ризики, фенологічний інтервал безпеки, термічний режим

1 ВСТУП

Зміни клімату, що спостерігаються в останні десятиліття, мають неоднозначний та часто парадоксальний вплив на агрокліматичні умови Європейського континенту. Однією з найбільш гострих проблем для сучасного рослинництва є дестабілізація термічного режиму, яка проявляється через зростання амплітуди температурних коливань. Для садівництва це створює ситуацію «по-

двійного ризику»: тривалі зимові та ранньовесняні відлиги провокують передчасне відновлення вегетації плодівих культур, що робить їх критично вразливими до наступних поворотних холодів. Зміна глобального клімату суттєво трансформує ризики для помірних екосистем та агросфери. Одним із найбільш критичних факторів виступають пізні весняні заморозки, які часто називають «фальшивими веснами» (false springs). Як зазначають дослідники, ці явища накладають серйозні обмеження на ареали розповсюдження видів і за-

вдають значних екологічних та економічних збитків [1]. Перші дослідження заморозків і пошкоджень ними сільськогосподарських культур були проведені ще у середині XIX століття. У минулому столітті ґрунтовні дослідження стосовно походження та характеристик заморозків були проведені І.А. Гольцберг. Саме вона надала сучасне визначення заморозку, а також обґрунтувала наявність трьох типів заморозків, зокрема адвективно-радіаційних. Також дослідженням заморозків займалися в різний час С.О. Сапожнікова, Т.В. Покровська, З.А. Міщенко, Г.В. Ляшенко. Результати сучасних досліджень заморозків та їх шкідливого впливу на сільськогосподарське виробництво представлені у багаточисленних джерелах, як вітчизняних, так і зарубіжних авторів [2, 3, 4, 5].

У роботі [6] представлені результати досліджень стосовно визначення ризиків пошкоджень винограду від весняних заморозків для двох локацій швейцарської долини Рони (більш тепле місце Сьон у порівнянні з прохолоднішим місцем Егль), де виноградарство є важливою частиною сільського господарства. На основі створеної фенологічної моделі було запропоновано індекси ризику заморозку, що враховують середньодобові та мінімальні температури.

Порівняння цих індексів за базовий період (1961–1990) та за період реалізації сценаріїв змін клімату (2021–2050) показало, що найближчим часом ризики пізніх весняних заморозків можуть зростати або зменшуватися залежно від місцезнаходження та сценаріїв зміни клімату, але у цілому вони залишаються актуальними для розглянутого періоду часу та двох місць дослідження.

У роботі молдавських фахівців [6] відзначається, що на території Республіки Молдова весняні заморозки можуть спостерігатися навіть більше ніж через місяць після стабільної температури вище 10°C. Небезпечні заморозки, що з'являються на початку осені, настають до закінчення вегетаційного періоду з від'ємними температурами на тлі середньодобових температур вище 10°C.

Заморозки впливають не тільки на плодові культури. Дослідження [8] впливу весняних та осінніх заморозків на п'ять найважливіших з економічного точки зору європейських видів дерев (ялицю срібну, ялину звичайну, модрина європейську, бук європейський та дуб черешковий) показали, що листяні породи більш чутливі до пізніх заморозків, що значно зменшують приріст поточного року і ростові процеси повністю відновлюються лише через два роки. Автори вважа-

ють, що зростання найбільш розповсюджених європейських видів дерев у майбутньому все більше обмежуватиметься змінами клімату. Основна небезпека пізніх весняних заморозків полягає в тому, що потепління стимулює раніший початок вегетації, через що чутливі тканини рослин опиняються під ударом у періоди, коли ймовірність заморозків все ще залишається високою. Це створює гостру потребу в розробці надійних методів прогнозування ризиків у розрізі біології конкретних видів.

Водночас, сучасні підходи до оцінки цих ризиків стикаються з методологічними труднощами. Аналіз останніх досліджень показує наявність суттєвих розбіжностей між емпірично визначеними та отриманими за допомогою моделювання порогами пошкоджень [9]. Особливий науковий інтерес викликає регіональна специфічність цього явища. На фоні глобального потепління в низці європейських регіонів спостерігається позитивна динаміка. До прикладу, у Чехії (за даними досліджень 1961–2020 рр.) фіксується поступове зменшення частоти виникнення заморозків у вегетаційний період, що знижує кліматичний тиск на агросектор [10]. Натомість у Закарпатті спостерігається протилежна тенденція: попри загальне підвищення температур, інтенсивність та ймовірність заморозків зростає, а беззаморозковий період скорочується [11].

Така розбіжність трендів зумовлена складним фізико-географічним положенням регіону та особливостями синоптичних процесів. В умовах Закарпатської області, яка є зоною підвищеного ризику, попри високий тепловий потенціал, вивчення динаміки заморозків та їхнього впливу на плодові культури є критично важливим для мінімізації економічних збитків та адаптації садівництва до нових кліматичних реалій.

Для комплексної характеристики заморозків важливою є інформація про фазу розвитку культури під час заморозку, стійкість її до зниження температури у цю фазу, про інтенсивність самого заморозку. Найбільш суттєву шкоду плодовим завдають пізні весняні заморозки, особливо коли вони співпадають з розгортанням бруньок та цвітінням. Квіти починають пошкоджуватись при заморозках -2°C, -3°C. Зниження температури до -5°C, -8°C призводить до масових пошкоджень та до повної загибелі плодів [6].

Метою дослідження є комплексне оцінювання впливу весняних заморозків на фенологічний розвиток та стабільність плодоношення кісточкових і зерняткових культур у Закарпатській області в умовах сучасних кліматичних змін. Робота спрямована на виявлення закономірностей

деградації «фенологічного інтервалу безпеки» (часового розриву між останнім критичним заморозком і початком цвітіння) у різних агрокліматичних зонах регіону — від низини до гірських районів. На основі аналізу багаторічних даних (2001–2025 рр.) дослідження обґрунтовує рівень адаптованості різних видів плодів до дестабілізації термічного режиму та доводить необхідність впровадження систем активного протизаморозкового захисту в сучасному промисловому садівництві.

2 ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процеси вегетації та стабільність плодоношення зерняткових (яблуна, груша) і кісточкових (вишня, слива, черешня, абрикос) культур у різних агрокліматичних зонах Закарпатської області. Для аналізу використано масиви багаторічних метеорологічних та фенологічних спостережень за період 2001–2025 рр. Закарпатського обласного центру з гідрометеорології. Дані метеорологічних спостережень використано з 8 метеостанцій Закарпатської області (Берегове, Ужгород, Хуст, Великий Березний, Рахів, Закарпатська, Нижні Ворота, Нижній Студений. Базовими пунктами фенологічних спостережень обрано метеостанції Берегове (низинна зона), Хуст (передгір'я) та Нижні Ворота (гірська зона), що дозволило врахувати орографічну специфіку.

Для оцінки часової динаміки фенологічного інтервалу безпеки використовувалася різниця між фактичною датою останнього заморозку -2°C та фактичною датою досягнення масового цвітіння плодової культури.

Виявлення тенденцій у зміні часової динаміки фенологічного інтервалу безпеки здійснювалося за допомогою методу лінійної апроксимації (метод найменших квадратів).

У роботі застосовано комплексний підхід, що базується на аналізі:

- термічних ресурсів. Розрахунок сум ефективних температур (вище $+5^{\circ}\text{C}$) для визначення строків настання фаз цвітіння. Згідно з агрометеорологічними нормами, пороговими значеннями для початку масового цвітіння було прийнято: для абрикоса 88°C , для груші та сливи 125°C , вишні 150°C , яблуні 185°C [6];

- заморозконебезпечності. Оцінка інтенсивності (-2°C) та ймовірності останніх весняних заморозків;

- стійкості культур. Використання критичних температур пошкодження для фази цвітіння.

Побудова карт-схем територіального розподілу дат останніх заморозків інтенсивністю -2°C та карт-схем дат цвітіння плодів здійснювалася методом просторової інтерполяції методом кригінгу.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведений аналіз агрокліматичних показників за період 2001–2025 рр. свідчить про стійку тенденцію до інтенсифікації термічних ресурсів у ранньовесняний період. Результати узагальнення фенологічних спостережень за плодами культур на метеостанціях Закарпатської області за досліджуваний період наведено в табл. 1.

Аналіз даних свідчить про значну часову та просторову варіативність настання фази цвітіння, що зумовлено як біологічними особливостями культур, так і вертикальною зональністю регіону. Встановлено, що середні дати цвітіння в низинній зоні (Берегове, Хуст) припадають на другу та третю декади квітня. Зокрема, для сливи та черешні середні терміни настання фази коливаються в межах 19.04–24.04. Найпізніше серед досліджуваних культур зацвітає яблуна, для якої в низинній зоні середня дата становить 26.04, а в гірській (Нижні Ворота) - 14.05, що демонструє затримку вегетації на один місяць при збільшенні висоти місцевості.

Таблиця 1 - Настання фази цвітіння у плодів

Table 1 - Onset of the flowering stage in fruit crops

Метеостанція	Середня дата	Найраніша дата	Найпізніша дата
Яблуна			
Берегове	26.04	10.04.2024	11.05.2021
Нижні Ворота	14.05	20.04.2024	24.05.2021
Слива			
Берегове	19.04	04.04.2014	30.04.2006
Хуст	24.04	08.04.2024	04.05.2021
Черешня			
Хуст	21.04	04.04.2024	04.05.2021
Груша			
Берегове	26.04	06.04.2014	08.05.2003

2024 рік став аномальним для більшості культур. На метеостанції Берегове цвітіння яблуні розпочалося 10 квітня (на 16 днів раніше середніх дат за період дослідження), а на метеостанції Хуст черешня та слива зацвіли вже 4 та 8 квітня відповідно. Це підтверджує наявність тенденції до зсуву сезонного розвитку плодів культур у бік більш ранніх строків. Амплітуда між найранішими та найпізнішими датами цвітіння для більшості культур становить від 20 до 32 днів, що підтверджує високу пластичність плодів культур до термічних умов весняного періоду та водночас вказує на нестабільність сучасного кліматичного

режиму.

Останні весняні заморозки інтенсивністю -2°C в низинно-передгірних районах спостерігаються в середньому в першій декаді квітня (табл. 2). В північній частині передгір'я та в гірських районах наприкінці другої-третьої декаді квітня. Місцями в горах заморозки відповідної інтенсивності фіксуються і на початку травня. Найпізніші дати настання заморозку -2°C відмічались на початку травня, в горах – наприкінці травня.

Таблиця 2 - Дати останнього ранньовесняного заморозку інтенсивністю -2°C

Table 2 - Dates of the last early spring frosts with intensity of -2°C

Метеостанція	Середня дата	Найраніша дата	Найпізніша дата
Берегове	03.04	17.03.2017	06.05.2011
Ужгород	10.04	13.03.2014	10.05.2017
Хуст	03.04	11.03.2014	02.05.2007
Великий Березний	18.04	31.03.2008	13.05.2020
Рахів	17.04	30.03.2023	30.05.2014
Закарпатська	24.04	03.04.2018	16.05.2025
Нижні Ворота	29.04	29.03.2008	22.05.2020
Нижній Студений	04.05	12.04.2002	23.05.2020

Для візуалізації встановлених часових параметрів та виявлення територіальних закономірностей поширення заморозків було проведено просторовий аналіз. Результати картографічного моделювання (рис. 1) демонструють чітку залежність дат припинення заморозків від гіпсометричних умов регіону. Слід зазначити, що території з висотами понад 600 м над рівнем моря не включені в дослідження, оскільки вони знаходяться поза межами активного сільськогосподарського використання та промислового вирощування плодів культур. На картах ці зони виділені фоновим білим кольором як такі, що не мають агрокліматичного значення для цілей даного дослідження.

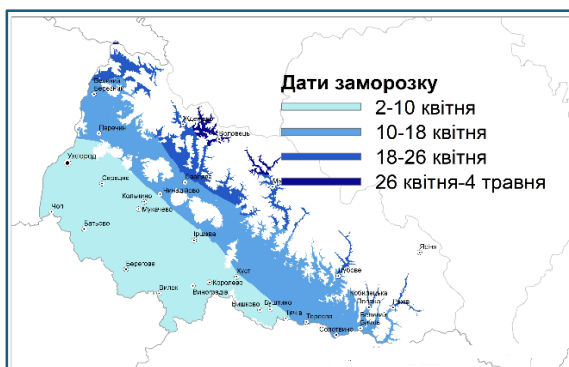


Рис. 1 - Дати останнього весняного заморозку -2°C

Fig. 1 - Dates of the last spring frost of -2°C

Загалом, порівнюючи середні дати цвітіння плодів культур в різних агрокліматичних зонах та середні дати останнього заморозку в повітрі інтенсивністю -2°C , можна зробити висновок що найбільш адаптованою для сучасних агрокліматичних умов регіону є яблуня, у якої масова фаза цвітіння в усіх зонах розпочинається на 24-26 днів пізніше після дати останнього критичного заморозку (рис. 2).

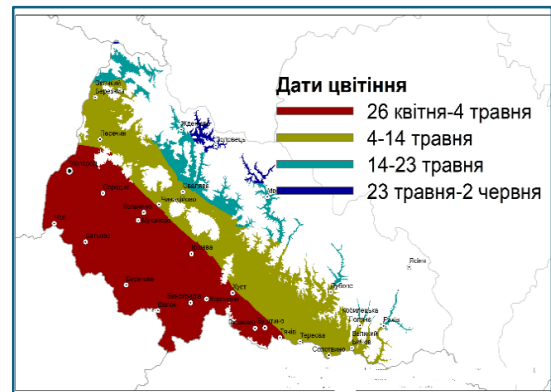


Рис. 2 - Дати цвітіння яблуні

Fig. 2 - Flowering dates of apple

Наступною плодовою культурою, більш адаптованою для регіону є вишня. Хоча її цвітіння відбувається трохи раніше за яблуню, вона більш стійка до весняних заморозків. Зацвітає вишня в середньому на 22 дні пізніше середнього останнього заморозку інтенсивністю -2°C (рис. 3).

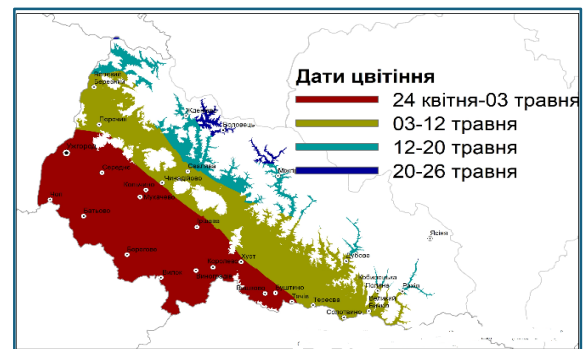


Рис. 3 - Дати цвітіння вишні

Fig. 3 - Flowering dates of sour cherry trees

Груша, слива та черешня демонструють задовільний рівень безпеки. Попри більш ранні терміни цвітіння порівняно з яблунею (рис. 4), часовий розрив між заморозками та цвітінням становить 17-20 днів, що є достатнім для мінімізації ризиків.

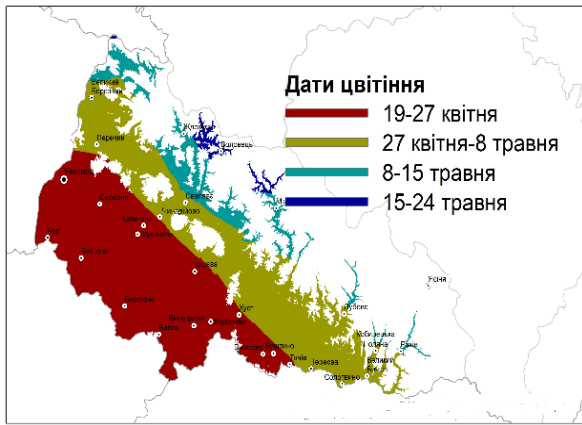


Рис. 4 - Дати цвітіння черешні, сливи, груші
Fig. 4 - Flowering dates of sweet cherry, plum, and pear trees

Вирощування у промислових масштабах абрикосу класифікується як високоризиковане. Майже у 100% випадків фаза цвітіння збігається з датами останніх заморозків інтенсивністю -2°C , що зумовлює нестабільність плодоношення (рис.5).

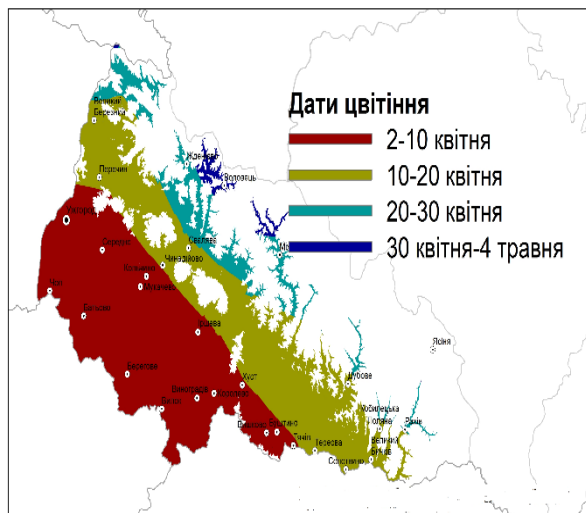


Рис. 5 - Дати цвітіння абрикосу
Fig. 5 - Flowering dates of apricot trees

Проте порівнюючи фактичні дані цвітіння плодових та дати останнього заморозку -2°C за останні 25 років спостерігається тенденція до зближення цих дат. Ранні культури (черешня, слива) дедалі частіше потрапляють у «заморозкову пастку» через раннє настання вегетаційних процесів. В цей же час лінія початку цвітіння яблуні утримує найбільшу та найстабільнішу часову дистанцію від лінії останнього весняного заморозку протягом усього досліджуваного періоду (рис. 6).

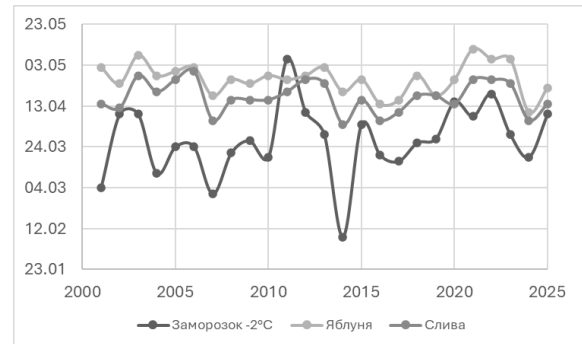


Рис. 6 - Динаміка цвітіння яблуні і сливи у порівнянні з датою останнього весняного заморозку -2°C по М Берегове
Fig. 6 - Dynamics of Apple and Plum Flowering in Relation to the Date of the Last Spring Frost (-2°C) in Berehove

Для більш точної оцінки тенденції підвищення такого небезпечного метеорологічного явища як заморозки, проведено розрахунок фенологічного інтервалу безпеки - кількості днів між останнім критичним заморозком -2°C та датою початку цвітіння яблуні і сливи. Згідно з результатами лінійної апроксимації (пунктир) (рис. 7), спостерігається стрімке зменшення днів фенологічного інтервалу безпеки для обох культур. Для яблуні середній інтервал безпеки на початку 2000-х становив близько 40 днів, тоді як до 2025 року він скоротився до 20 днів. Для сливи ситуація критичніша: інтервал скоротився з 30 днів до менш ніж 15 днів.

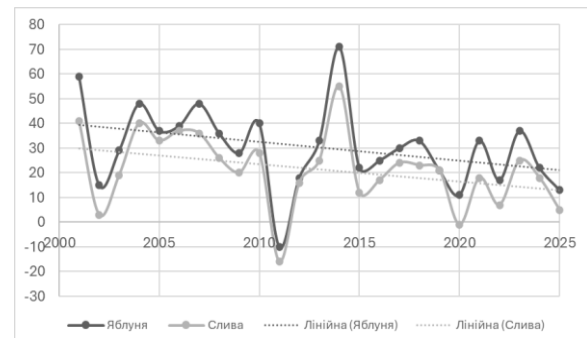


Рис. 7 - Фенологічний інтервал безпеки (дні) для яблуні і сливи по М Берегове
Fig. 7 - Phenological Safety Margin (days) for Apple and Plum in Berehove

В передгрітій кісточковій (слива, черешня) перебувають у зоні підвищеного ризику. За період спостережень з 2001 по 2025 рік зафіксовано численні випадки, коли дата останнього весняного заморозку -2°C збігається або перевищує дату цвітіння. Ймовірність таких випадків сягає біля 28%. Найбільш загрозлива ситуація спостерігалась у 2007 році, коли дата останнього заморозку змістилась на першу декаду квітня (рис. 8).

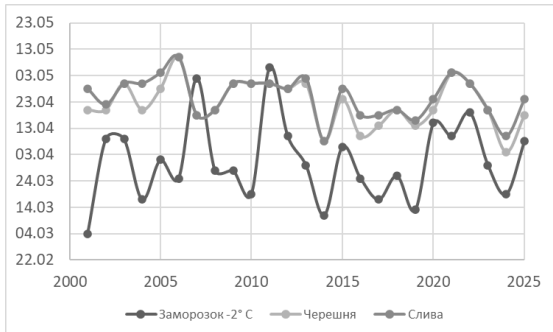


Рис. 8 - Динаміка цвітіння черешні і сливи у порівнянні з датою останнього весняного заморозку -2°C по М Хуст
Fig. 8 - Dynamics of Cherry and Plum Flowering in Relation to the Date of the Last Spring Frost (-2°C) in Khust

На відміну від зерняткових, кісточкові культури (черешня, слива) мають значно вужчий фенологічний інтервал безпеки, що робить їх критично вразливими до весняних заморозків. Лінії лінійної регресії (пунктир) для обох культур мають чітко виражений спадний характер. На початку 2000-х років середній інтервал безпеки коливався в межах 25–30 днів (рис. 9) Станом на 2025 рік значення інтервалу опустилося до 10–15 днів, що фактично нівелює природний захист рослин від заморозків.

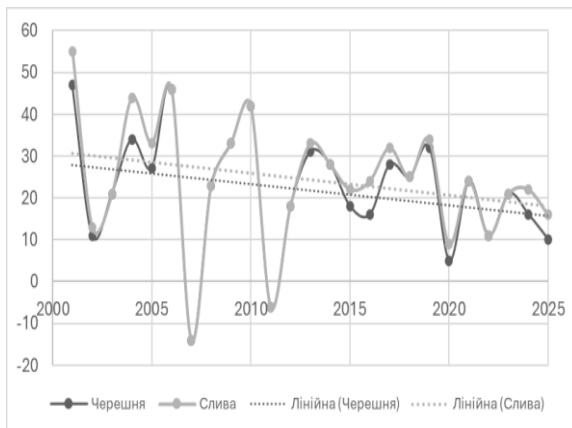


Рис. 9 - Фенологічний інтервал безпеки (дні) для черешні і сливи по М Хуст
Fig. 9 - Phenological Safety Margin (days) for Cherry and Plum in Khust

Аналіз багаторічних даних дат цвітіння яблуні на метеостанції Нижні Ворота, яка представляє гірську територію Закарпаття, демонструє специфічний ризик для яблуні (рис. 10). Попри те що в цій зоні фаза цвітіння настає значно пізніше, ймовірність її збігу з пізніми весняними заморозками залишається високою і становить 24%.

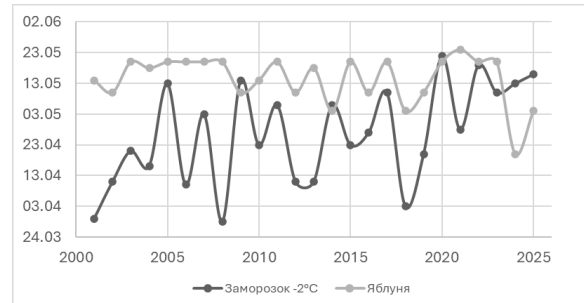


Рис. 8 - Динаміка цвітіння яблуні у порівнянні з датою останнього весняного заморозку -2°C по М Нижні Ворота
Fig. 8 - Dynamics of Apple Flowering in Relation to the Date of the Last Spring Frost (-2°C) in Nyzhni Vorota

На відміну від низинних районів, гірські умови М Нижні Ворота демонструють найвищу амплітуду нестабільності та найшвидшу деградацію безпекового інтервалу навіть для такої стійкої культури, як яблуня (рис. 11). Лінія лінійної регресії (пунктир) демонструє стрімке падіння: від середніх 35 днів на початку 2000-х років до 0 днів у 2025 році. Це означає, що за 25 років яблуня в цій зоні повністю втратила свій часовий «імунітет» до весняних заморозків. На графіку чітко видно шість років (2009, 2014, 2020, 2022, 2024, 2025), коли інтервал безпеки був або нульовим, або глибоко від'ємним. Показник 2024 року (біля -23 днів) є абсолютним антирекордом. Це свідчить про те, що заморозок стався через три тижні після початку цвітіння, що є нищівним для майбутнього врожаю.

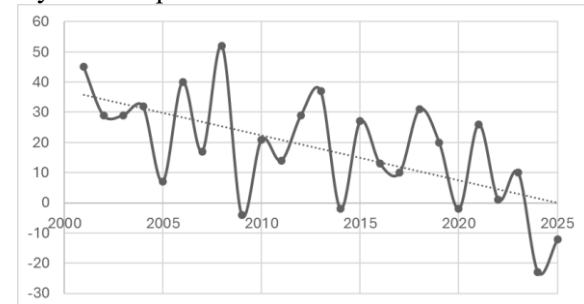


Рис. 11 - Фенологічний інтервал безпеки (дні) для яблуні по М Нижні Ворота
Fig. 11 - Phenological Safety Margin (days) for Apple in Nyzhni Vorota

Отже, порівняльний аналіз динаміки фенологічного інтервалу безпеки свідчить про територіальну неоднорідність кліматичних ризиків. Якщо у низинах і передгір'ї (Берегово, Хуст) спостерігається лише скорочення цього інтервалу, то в гірських умовах (Нижні Ворота) ситуація характеризується значним зростанням агрокліматичної вразливості.

4 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані дані підтверджують гіпотезу про те, що сучасне потепління не знижує, а навпаки, підвищує агрокліматичні ризики для садівництва Закарпаття. Деградація інтервалу безпеки переводить регіон із зони помірного ризику до зони високого ризику для більшості кісточкових культур.

З огляду на це, стратегія розвитку галузі повинна базуватися не лише на підборі пізньоквітучих сортів, а й на впровадженні систем активного захисту (антизаморозкове зрошення, теплові гармати, вітрові установки). Це є критично необхідним для збереження врожайності в умовах, коли природний захист рослин (через пізній початок вегетації) фактично перестав функціонувати.

5 ВИСНОВКИ

У ході проведеного дослідження було проаналізовано вплив весняних заморозків на плоді культури Закарпаття та встановлено, що темпи зміщення дат цвітіння плодових культур на більш ранні терміни суттєво випереджають темпи відступу весняних заморозків. Це призвело до того, що за останні 25 років (2001–2025 рр.) природний механізм захисту рослин, що базувався на пізніших фазах розвитку, практично втратив свою ефективність.

Виявлено закономірне звуження «фенологічного інтервалу безпеки» у всіх досліджуваних зонах. Найбільш критична ситуація спостерігається

в гірській зоні (М Нижні Ворота), де безпекове вікно для яблуні скоротилося з 35 днів до нульових або від'ємних значень. У низинних районах (М Берегове) цей показник для яблуні все ще зберігає певний буфер (близько 20 днів), проте також демонструє стабільну тенденцію до зниження.

Найбільш адаптованою культурою до сучасних агрокліматичних умов регіону залишається яблуня, у якої цвітіння зазвичай розпочинається через 24–26 днів після останнього критичного заморозку. Натомість вирощування абрикосу класифікується як високоризиковане, оскільки фаза їх цвітіння майже у 100% випадків збігається з періодом небезпечних знижень температури.

Підтверджено високу просторову мінливість настання фенофаз, зумовлену рельєфом. Різниця у строках цвітіння між низинними та гірськими районами може досягати 15–25 діб. При цьому гірські райони демонструють найшвидшу деградацію стабільності навіть для стійких сортів.

Отримані результати свідчать про перехід промислового садівництва Закарпаття до категорії високоризикового землеробства. Це зумовлює необхідність обов'язкового впровадження активних систем протизаморозкового захисту (системи зрошення, туманоутворення, вітрові машини) та ретельного підбору сортів із пізніми термінами цвітіння. Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка мікрокліматичного районування для виявлення безпечних «мезозон», придатних для вирощування найбільш чутливих культур.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Chamberlain, C., Cook, B. I., García de Cortázar-Atauri, I., & Wolkovich, E. (2019). Rethinking false spring risk. *Global Change Biology*, 25(10), 2209–2220. <https://doi.org/10.1111/gcb.14642>
- Олексієнко І.М., Затула В.І. Кліматична оцінка ступеня пошкодження плодових культур заморозками на території України. Тези доповідей Першого Всеукраїнського гідрометеорологічного з'їзду (Одеса, ОДЕКУ, 22–23 березня 2017). Одеса: ТЕС, 2017. С. 87–88.
- Олексієнко І.М., Затула В.І. Пізні весняні та ранні осінні заморозки в Україні в умовах сучасних змін клімату. Збірник наукових праць Військового інституту КНУ ім. Т.Г. Шевченка. 2010. Том 27. С. 353–358 http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viking/db/ftp/univ/znp_vi_knu/znp_vi_knu_2010_27.pdf
- Маринін Є.І. Ризики пошкодження винограду заморозками на території Північно-Західного Причорномор'я: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.09 – метеорологія, кліматологія, агрометеорологія. / Маринін Є.І.; Одеський державний екологічний університет. Одеса, 2015. 20 с.
- Ляшенко Г. В., Мельник Е. Б., Суздалова В. І., Любка О. С., Маймеско В. В. Агрокліматична оцінка морозо- і заморозкобезпеки стосовно винограду в Закарпатті. Виноградарство і виноробство. 2018. Вип. 55. С. 85–92.
- Meier M., Fuhrer J., Holzkämper A. Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley. *International Journal of Biometeorology*. 2018. Vol. 62. Pp. 991–1002. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1501-y>
- Botnari A., Botnari A. Impact of late and early frost on agriculture. Case study – Republic of Moldova. *Geoconcept Journal*. Special Issue: Geoscience in the Carpathian and Black Sea Region. 2023. Vol. 4. No. 1. Pp. 63–67 <https://geoconcept-journal.com/index.php/geosp/special/view/4>
- Vitasse Y., Bottero A., Cailleret M. et al. Contrasting resistance and resilience to extreme drought and late spring frost in five major European tree species. *Global Change Biology*. 2019. Vol. 25. Issue 11. Pp. 3781–3792. <https://doi.org/10.1111/gcb.14803>
- Kirchhof E., Campos-Arguedas F., Arias N. S., Kovalski A. P. Thresholds for spring freeze: measuring risk to improve predictions in a warming world. *New Phytologist*. 2025. <https://doi.org/10.1111/nph.70453>
- Mozny, M., Trnka, M., & Žalud, Z. Changing Climatic Conditions in Czechia Require Adaptation Measures in

- Agriculture. *Climate*. 2023. 11(10). 210.
<https://doi.org/10.3390/cli11100210>
11. Куклишин О.В., Вольвач О.В (2025) Аналіз динаміки весняних заморозків у Закарпатті за останні двадцять років. Сільське господарство і зміни клімату: наукові підходи та інновації для стійкого майбутнього : зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. молод. вчених, з нагоди Дня науки в Україні (Одеса, 16 трав. 2025 р.). С. 45–48.
 12. Польовий А.М. Божко Л.Ю, Вольвач О.В. Основи агрометеорології: підручник. Одеса: ТЕС, 2012. 250 с.
 13. Адаменко Т. І. (2014). Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату. Київ.
 14. Hájková L., Možný M., Oušková V., Bartošová L., Dížková P., Žalud Z. Increasing Risk of Spring Frost Occurrence during the Cherry Tree Flowering in Times of Climate Change. *Water*. 2023. Vol. 15. Issue 3. 497.
<https://doi.org/10.3390/w15030497>
 15. Kiss V., Minarik M., Prcik M., Snopkova Z., Tarnik A. The influence of climate change on the beginning of flowering of pear (*Pyrus communis*, L.) and cherry (*Cerasus avium*, L.) and the probability of spring frosts in Slovakia. *Proceedings of 24th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2024. Vol. 24. Issue 4.2.
<https://doi.org/10.5593/sgem2024v/4.2/s19.48>
- ## REFERENCES
1. Chamberlain, C., Cook, B. I., García de Cortázar-Atauri, I., & Wolkovich, E. (2019). Rethinking false spring risk. *Global Change Biology*, 25(10), 2209–2220.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14642>
 2. Oleksienko I.M., Zatulá V.I. Klimatychna otsinka stupenia poshkodzhennia plodovykh kultur zamorozkamy na terytorii Ukrainy [Climatic assessment of the degree of damage to fruit crops by frosts in Ukraine]. *Tezy dopovidei Pershoho Vseukrainskoho hidrometeorologichnoho zizdu (Odesa, ODEKU, 22–23 bereznia 2017)* [Abstracts of the First All-Ukrainian Hydrometeorological Congress (Odesa, OSENU, March 22–23, 2017)]. Odesa: TES, 2017. Pp. 87–88.
 3. Oleksienko I.M., Zatulá V.I. Pizni vesniani ta ranni osinni zamorozky v Ukraini v umovakh suchasnykh zmin klimatu [Late spring and early autumn frosts in Ukraine under modern climate change conditions]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu KNU im. T.H. Shevchenka* [Collection of Scientific Papers of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv]. 2010. Vol. 27. Pp. 353–358. Available at: http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viing/db/ftp/univ/zn_p_vi_knu/zn_p_vi_knu_2010_27.pdf
 4. Marynin Ye.I. Ryzyky poshkodzhennia vynohradu zamorozkamy na terytorii Pivnichno-Zakhidnoho Prychornomoria [Risks of grapevine damage by frosts in the North-Western Black Sea region]: *avtoref. dys. ... kand. heohr. nauk: 11.00.09 – meteorohiia, klimatohiia, ahrometeorohiia* [Extended abstract of Cand. Geogr. Sci. diss.: 11.00.09 – Meteorology, Climatology, Agrometeorology]. Odeskyi derzhavnyi ekolohichnyi universytet [Odesa State Environmental University]. Odesa, 2015. 20 p.
 5. Liashenko H. V., Melnyk E. B., Suzdalova V. I., Liubka O. S., Maimenko V. V. Ahroklimatychna otsinka morozo- i zamorozkonebezpechnosti stosovno vynohradu v Zakarpatti. *Vynohradarstvo i vynorobstvo*. 2018. Vyp. 55. S. 85–92.
 6. Meier M., Fuhrer J., Holzkämper A. Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley. *International Journal of Biometeorology*. 2018. Vol. 62. Pp. 991–1002.
<https://doi.org/10.1007/s00484-018-1501-y>
 7. Botnari A., Botnari A. Impact of late and early frost on agriculture. Case study – Republic of Moldova. *Geoconcept Journal. Special Issue: Geoscience in the Carpathian and Black Sea Region*. 2023. Vol. 4. No. 1. Pp. 63–67. <https://geoconcept-journal.com/index.php/geosp/issue/view/4>
 8. Vitasse Y., Bottero A., Cailleret M. et al. Contrasting resistance and resilience to extreme drought and late spring frost in five major European tree species. *Global Change Biology*. 2019. Vol. 25. Issue 11. Pp. 3781–3792.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14803>
 9. Kirchhof E., Campos-Arguedas F., Arias N. S., Kovaleski A. P. Thresholds for spring freeze: measuring risk to improve predictions in a warming world. *New Phytologist*. 2025.
<https://doi.org/10.1111/nph.70453>
 10. Možný, M., Trnka, M., & Žalud, Z. (2023). Changing Climatic Conditions in Czechia Require Adaptation Measures in Agriculture. *Climate*, 11(10), 210.
<https://doi.org/10.3390/cli11100210>
 11. Kuklyshyn, O. V., & Volvach, O. V. (2025). Analiz dynamiky vesnianykh zamorozkiv u Zakarpatti za ostanni dvadtsiat rokiv [Analysis of the dynamics of spring frosts in Zakarpattia over the last twenty years]. *Sil's'ke hospodarstvo i zminy klimatu: naukovi pidkhody ta innovatsii dlia stiikoho maibutnoho* (Odesa, May 16, 2025), pp. 45–48, 267–268
 12. Polevoi A.M., Bozhko L.Iu., Volvach O.V. *Osnovy ahrometeorologii: pidruchnyk* [Fundamentals of agrometeorology: a textbook]. Odesa: TES, 2012. 250 p.
 13. Адаменко, Т. І. (2014). Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату [Agroclimatic zoning of the territory of Ukraine taking into account climate change]. Kyiv.
 14. Hájková L., Možný M., Oušková V., Bartošová L., Dížková P., Žalud Z. Increasing Risk of Spring Frost Occurrence during the Cherry Tree Flowering in Times of Climate Change. *Water*. 2023. Vol. 15. Issue 3. 497.
<https://doi.org/10.3390/w15030497>
 15. Kiss V., Minarik M., Prcik M., Snopkova Z., Tarnik A. The influence of climate change on the beginning of flowering of pear (*Pyrus communis*, L.) and cherry (*Cerasus avium*, L.) and the probability of spring frosts in Slovakia. *Proceedings of 24th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2024. Vol. 24. Issue 4.2.
<https://doi.org/10.5593/sgem2024v/4.2/s19.48>

AGROCLIMATIC RISK ASSESSMENT OF SPRING FROSTS FOR FRUIT CROPS IN THE TRANSCARPATHIAN REGION UNDER MODERN CLIMATE CHANGE

O.V. Kuklyshyn, O.V. Volvach

*Odesa I.I. Mechnikov National University,
2, V. Zmiiienka Str., 65016 Odesa, Ukraine kuklyshyn.oksana@stud.onu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0005-9793-8285> , <https://orcid.org/0000-0002-6650-758X>*

This study addresses the urgent issue of adapting industrial fruit growing to the transforming climatic regime in the Transcarpathian region. The research focuses on analyzing risks arising from spring frosts with intensities down to -2°C , which are critical for fruit trees during the flowering phase. The study covers a long-term observation period from 2001 to 2025, allowing for the identification of stable trends in the region's thermal regime changes.

We have established that global warming creates a paradoxical situation for Transcarpathian horticulture. On one hand, there is an increase in the sum of active temperatures; on the other hand, there remains a consistently high frequency of late spring frosts. The research indicates that the onset dates of the flowering phase for pome and stone fruits are shifting to earlier dates. At the same time, the dates of the last spring frosts do not show a proportional shift toward the beginning of spring. This leads to a critical reduction in the "phenological safety interval," defined here as the time gap between the last critical temperature drop and the onset of mass flowering.

We identified significant spatial differentiation in agroclimatic risks depending on elevation and topographical features. The most threatening situation is characteristic of mountainous areas, particularly according to data from the Nyzhni Vorota meteorological station, where the amplitude of safety interval fluctuations is maximal. The study assessed the impact of warming on specific crop types. We established that apricot is the most vulnerable crop, as its flowering phase in most studied years completely coincides with the period of probable frosts. Comparative analysis showed that the apple tree is the most adapted to modern conditions, maintaining a more stable safety interval due to later vegetation stages. Conversely, plum and sweet cherry demonstrate a trend toward the convergence of flowering dates with the last frost dates, increasingly leading these crops into a "frost trap" and resulting in partial or total crop loss.

The results obtained characterize the patterns of degradation in the temporal resources for safe horticultural development. We have proven that minimizing yield losses requires a revision of orchard placement strategies and the implementation of active protection methods, such as artificial fogging systems and wind machines. This work confirms the hypothesis regarding the necessity of microclimatic zoning for the effective management of high-risk agricultural production.

Keywords: spring frosts, flowering phenology, fruit crops, Transcarpathia, climate change, agroclimatic risks, phenological safety interval, thermal regime.

*Подання до редакції : 17. 02. 2026
Надходження остаточної версії : 22. 04. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026*

УДК 556.5:551.468.4

ЗМІНИ ПОКАЗНИКІВ ГІДРОЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ТИЛІГУЛЬСЬКОГО ЛИМАНУ ПІСЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ З'ЄДНУЮЧОГО З МОРЕМ КАНАЛУ

**Ю. С. Тучковенко, М. О. Мартинюк, Ю. І. Богатова, О. П. Гаркуша,
С. Г. Бушуєв, К. С., Калашнік**

*ДУ «Інститут морської біології Національної академії наук України»
вул. Пушкінська, 37, 65048, Одеса, Україна,
tuch2001@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

У 2016-2017 роках проводилась реконструкція з'єднувального каналу «Тилігульський лиман - Чорне море» з метою покращення гідроекологічного стану лиману шляхом збільшення його зовнішнього водообміну з морем. Стаття присвячена аналізу змін гідроекологічного стану лиману за комплексом гідрологічних, гідрохімічних і гідробіологічних характеристик його екосистеми, які відбулися після реконструкції з'єднувального каналу. В основу порівняльного аналізу покладені дані отримані в результаті щомісячного гідроекологічного моніторингу лиману протягом 2025 року, а також ретроспективні дані щодо характеристик його гідроекологічного стану отримані до реконструкції каналу.

Встановлено, що реконструкція з'єднувального каналу не досягла своєї основної мети, оскільки не відбулось зменшення солоності вод в лимані в результаті інтенсифікації зовнішнього різноспрямованого водообміну лиману з морем, збільшилися концентрації мінерального і органічного азоту та фосфору в водах лиману порівняно з періодом до реконструкції каналу, зменшилось видове різноманіття фітопланктону, в основному з переважанням морських видів; зменшилися видове розмаїття та улови риби у лимані; стан іхтіофауни та рибопродуктивність лиману не покращилися і залишаються нестабільними. Головна причина цього полягає у невідповідності проєктним вимогам морфометричних характеристик з'єднувального каналу, недотримання встановлених правил його експлуатації і, додатково, в будівництві нового мостового переходу через канал, який утруднив водообмін лиману з морем. Наприкінці червня 2025 року середня площа поперечних перерізів каналу була в 2,8 разів меншою за проєктну, а середня глибина каналу – в 2,2 рази меншою за проєктну (2,0 і 0,91 м відповідно).

Зроблений загальний висновок, що реконструкція з'єднувального каналу «море-лиман», проведена в період 2016-2017 рр., не досягла своєї мети. Надані рекомендації щодо здійснення заходів для поліпшення сучасного гідроекологічного стану Тилігульського лиману.

Ключові слова: північно-західна частина Чорного моря, Тилігульський лиман, гідроекологічний стан, з'єднувальний канал море-лиман, наслідки реконструкції

1. ВСТУП

Тилігульський лиман розташований на північному узбережжі північно-західної частини Чорного моря, в 40 км від м. Одеси на кордоні Одеської та Миколаївської областей (46° 39,3' - 47° 05,3' пн.ш., 30°57,3' - 31°12,7' сх.д.). Це найбільш великий та глибокий серед квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. Він є унікальною природною системою з численними природними ресурсами, які можуть бути використані для соціально-економічного розвитку прилеглих територій Одеської та Миколаївської областей України в сферах рекреації, екологічного туризму, охорони здоров'я, аквакультури та регламентованого

рибальства [1, 2]. Зокрема, лиман включений до територій двох регіональних ландшафтних парків в межах Одеської та Миколаївської областей. Також лиман включений до переліку ІВА-територій і міжнародного списку Рамсарської конвенції про захист водно-болотних угідь. В ньому розташоване одне з найбільших в Причорномор'ї родовищ мінеральних лікувальних магнієво-натрієвих мулових грязей.

Тилігульський лиман представляє собою затоплену морськими водами долину річки Тилігул, яка на теперішній час не має істотного зв'язку з морем. Довжина лиману становить близько 52 км, ширина змінюється на окремих

ділянках від 0,2 до 5,4 км. Лиман відокремлений від моря природним піщаним пересипом шириною від 3,3 до 4 км і завдовжки до 6,6 км. При позначці рівня води в лимані мінус 0,4 м БС (метрів у Балтійській системі висот і глибин) площа дзеркала його водної поверхні становить 129 км², об'єм вод – 693 млн. м³. Південна і центральна частини лиману є улоговинами з переважаючими глибинами в діапазоні 10-16 м, які розділені мілководною перемичкою. Максимальна глибина в південній частині лиману досягає 22,2 м. Північна частина лиману, в яку впадає річка Тилігул, мілководна, з глибинами менше 4 м. Середня глибина лиману становить 5,4 м. Площа водозбірної басейну Тилігульського лиману – 5420 км², основна частина прісного стоку в лиман (більше 85 %) надходить від річки Тилігул [1, 3].

Наприкінці 50-х років ХХ сторіччя в рибогосподарських цілях у пересипу Тилігульського лиману був побудований і в 1958 р. введений в експлуатацію штучний канал довжиною 3,3 км, який з'єднав лиман з морем. Канал повинен був забезпечити вхід навесні з моря в лиман чорноморської кефалі та інших видів морських риб, а також прісноводних риб, які виносилися в період весняного паводку з Дніпровсько-Бузького лиману до моря. Одночасно будівництво цього каналу вирішувало задачу регулювання водного балансу лиману з метою стабілізації рівня води в ньому. Первинна глибина каналу становила 3 м, а ширина – 30 м, на вході з боку моря канал був обладнаний шлюзом. Проте рибогосподарські цілі, поставлені при будівництві каналу, не були досягнуті через: по-перше, подальше зарегулювання стоку р. Дніпро каскадом гідроелектростанцій і, зокрема, створення Каховського водосховища із загальним об'ємом вод 18,2 км³ і корисним (робочим) об'ємом 6,8 км³, що призвело до зменшення інтенсивності весняного паводку і різкого скорочення виносу прісноводних риб з Дніпровського-Бузького лиману до прилеглої частини моря; по-друге, поступове багаторічне підвищення солоності води в самому Тилігульському лимані, зумовлене надходженням до нього солоних морських вод через штучний сполучний канал «море-лимани» [1, 4].

Гідрологічні і екологічні особливості Тилігульського лиману за даними моніторингу в період 2010-2015 рр. детально описані в роботах [1, 5-6]. В них, зокрема, відзначається, що внаслідок кліматичних змін в лимані посилюється дефіцит річного прісного водного

балансу, який за оцінками [7] в перші десятиліття ХХІ століття складав 35 млн. м³/рік (5% від загального об'єму в лимані). Тому забезпечення вільного водообміну лиману з прилеглою акваторією моря є необхідною умовою стабілізації його гідрологічного режиму і гідроекологічних умов.

За минулі роки після спорудження каналу, його південна частина, що примикає до моря, сильно обміліла внаслідок транспортування піску з боку моря. У ХХІ ст. канал функціонував нерегулярно, протягом 25-40 діб навесні та восени, після розчищення перших сотень метрів морської частини каналу від піщаних наносів. В результаті зменшення пропускної здатності каналу і інтенсивного випаровування з водної поверхні лиману влітку, з 2007 року почався період значного зниження рівня води в лимані, який тимчасово вдалося зупинити лише в 2010 р., коли канал був відкритий в період з квітня до серпня. До 2015 р. розчищення морської частини каналу стало неефективним через значне зменшення глибин на більшій частині його довжини. Було прийнято рішення про реконструкцію каналу, оскільки при тривалій відсутності зв'язку з морем в лимані не тільки виникає багаторічна тенденція зменшення об'єму води і, отже, відбувається його обміління, але й також швидкими темпами збільшується солоність води, концентрації біогенних і забруднюючих речовин [1, 6].

Реконструкція з'єднувального каналу шляхом його поглиблення до позначки мінус 2,2 м БС, що відповідає глибині в каналі $\approx 2,0$ м, проводилась в основному в 2016-2017 рр. В цей час канал був закритий. Хоча відкриття каналу відбулось на початку 2018 р., однак реконструкція каналу не була завершена остаточно, особливо в прилеглій до моря частині каналу, де станом на 2021 рік потрібно було провести додаткові роботи з відновлення внутрішньої частини каналу, укріплення його стінок, улаштування наносотримуючої споруди та ін. З початком війни у 2022 році ці роботи були припинені.

Мета роботи полягає у визначенні змін гідроекологічного стану Тилігульського лиману за комплексом гідрологічних, гідрохімічних і гідробіологічних характеристик його екосистеми, які відбулися після реконструкції з'єднувального каналу «море-лимани» та основних природних і антропогенних чинників, які зумовили ці зміни.

2. МЕТОДИ І МАТЕРІАЛИ

Для досягнення мети використовувались виконані протягом 2025 року фахівцями Інституту морської біології НАН України щомісячні польові дослідження характеристик поточного гідроекологічного стану Тилігульського лиману, а саме: гідрологічних (температура, солоність, відмітки рівня води, морфометричні характеристики з'єднувального каналу та ін.), гідрохімічних (розчинені мінеральні та органічні речовини азоту (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , N_{org}) і фосфору (PO_4^{3-} , P_{org}), кремнію (SiO_3^{2-}), вмісту розчиненого у воді кисню та % його насичення, БСК₅), гідробіологічних (фітопланктону, макрофітобентосу, стану іхтіофауни). Спостереження та відбір проб проводили за стандартною схемою станцій в прибережній зоні лиману і на прилеглому узмор'ї (на вході в з'єднувальний канал «море-лиман») до глибини 1 м (рис. 1). У липні та серпні 2025 р. проби на станції Кордон у верхів'ї лиману додатково відбирали на глибині 4 м, а в північній частині лиману, прилеглій по каналу, - на глибинах 5 і 10 м. За період з лютого по грудень 2025 р. було зібрано та оброблено 52 проби.

Визначення значень гідрохімічних показників проводили згідно з прийнятими міжнародними методиками для морських вод, з використанням повіреного вимірювального обладнання [8-10].

Також, з лютого по вересень 2025 р. було зібрано та оброблено 40 проб фітопланктону. Проби об'ємом 1 л фіксували 40% формаліном, а потім згущували осадовим методом, доводячи об'єм фільтрату до 25-60 мл [11]. Клітини фітопланктону рахували у краплі фільтрату об'ємом 0,05 мл. Біомасу мікродоростей визначали підрахунком "істинних" об'ємів клітин [12]. Номенклатурні назви мікродоростей приводяться згідно зведенням [13-16].

Відбір проб макрофітобентосу в Тилігульському лимані проводився на чотирьох прибережних станціях, з глибин від 0 до 0,5 м з використанням перифітонної рамки розміром 10х10 см. За період досліджень було відібрано і оброблено 205 кількісних проб макрофітобентосу. Для відбору й аналізу проб альгологічного матеріалу використовувалися класичні методи обліку макрофітів, включно з визначенням флористичного складу, проективного покриття, біомаси [17-19]. Номенклатура водоростей визначалась за міжнародним електронним каталогом AlgaeBase [20], імена авторів таксонів представлені у стандартному скороченні [21]. Визначення

категорій галобності і сапробності макрофітів Тилігульського лиману і порівняння їх з ретроспективними даними проводилося за монографією [22].

Дослідження біологічних характеристик іхтіофауни проводили за загальноприйнятими стандартними методиками [23-25]. Проби риб та безхребетних у Тилігульському лимані відбирали щосезонно біля с. Коблево та с. Кошари з уловів промислових ставних неводів (довжина крила 10–20 м, розмір вічка у котлі 6,5 мм) та бичкових ятерів (вічко 18 мм). Для оцінки видового складу та вивчення структури іхтіоценозу використовувалися різновічкові зяброві сітки відповідно стандарту EN 14757:2015 Water quality – Sampling of fish with multimesh gillnets.

Ретроспективні дані щодо характеристик гідроекологічного стану Тилігульського лиману у ХХІ столітті, до початку реконструкції з'єднувального каналу «море-лиман», брались з науково-технічних звітів за результатами досліджень виконаних в Одеському державному екологічному університеті та Інституті морської біології НАН України [26-28], а також з особистих архівів первинної інформації співавторів цієї статті, які склали основу наукових публікацій того періоду [1, 5, 6, 29], та інших дослідників [22, 30-32]. При аналізі багаторічних змін солоності води в лимані додатково залучались результати досліджень регіональних ландшафтних парків.

Характеристики гідрологічного режиму. Рівень води в Тилігульському лимані визначається об'ємами припливу вод з його водозбірної басейну, співвідношенням кількості атмосферних опадів, які випадають на водне дзеркало лиману, і об'ємами випаровування з нього, наявністю водообміну лиману з морем через штучний з'єднувальний канал [1]. В роки, коли водообмін з морем був тривалий час відсутній, рівень води в лимані знижувався на 1-1,5 м, порівняно з рівнем моря.

В 2025 році подача морської води в лиман через з'єднувальний канал розпочалась у березні. До кінця липня був відкритий тільки один шлюз, а в серпні – вже два шлюзи, які залишались відкритими до кінця листопада.

Вимірювання рівня води в лимані, які виконувались раз на місяць під час польових виїздів на лиман в північній (с. Калинівка) та південній (с. Кошари) його частинах, показали, що відмітка рівня води в лимані зменшувалась від мінус 0,35 м БС (метрів Балтійської системи) навесні 2025 року до мінус 0,54 м БС у липні

(23.07.2025) і потім до мінус 0,72 м БС у вересні (24.09.2025). В той же час, відмітка рівня моря (оцінена як середнє значення між спостереженими відмітками в портах Південний та Очаків) була завжди вищою, ніж в лимані, і змінювалась від мінус 0,11 м БС у квітні до

мінус 0,27 м БС наприкінці серпня. Це свідчить про те, що водообмін з морем через з'єднувальний канал «море-лиман» був недостатнім для вирівнювання рівнів води в лимані і морі.



Рис. 1 – Карта-схема станцій відбору проб на акваторії Тилигульського лиману

Fig. 1 –Map diagram of sampling stations in the water area of the Tylihul Estuary

Характеристики гідрологічного режиму. Рівень води в Тилигульському лимані визначається об'ємами припливу вод з його водозбірною басейну, співвідношенням кількості атмосферних опадів, які випадають на водне дзеркало лиману, і об'ємами випаровування з нього, наявністю водообміну лиману з морем через штучний з'єднувальний канал [1]. В роки, коли водообмін з морем був тривалий час відсутній, рівень води в лимані знижувався на 1-1,5 м, порівняно з рівнем моря.

В 2025 році подача морської води в лиман через з'єднувальний канал розпочалась у березні. До кінця липня був відкритий тільки

один шлюз, а в серпні – вже два шлюзи, які залишались відкритими до кінця листопаду.

Вимірювання рівня води в лимані, які виконувались раз в місяць під час польових виїздів на лиман в північній (с. Калинівка) та південній (с. Кошари) його частинах, показали, що відмітка рівня води в лимані зменшувалась від мінус 0,35 м БС (метрів Балтійської системи) навесні 2025 року до мінус 0,54 м БС у липні (23.07.2025) і потім до мінус 0,72 м БС у вересні (24.09.2025). В той же час, відмітка рівня моря (оцінена як середнє значення між спостереженими відмітками в портах Південний та Очаків) була завжди вищою, ніж в лимані, і

змінювалась від мінус 0,11 м БС у квітні до мінус 0,27 м БС наприкінці серпня. Це свідчить про те, що водообмін з морем через з'єднувальний канал «море-лиман» був недостатнім для вирівнювання для вирівнювання рівнів в лимані і моря.

У червні 2025 року були виконані промірні роботи у з'єднувальному каналі «море-лиман» (рис. 2), які показали (табл. 1), що при позначці рівня води в ньому з боку моря мінус 0,27 м БС і на виході каналу в лиман (біля мосту) - мінус 0,4 м БС, максимальні глибини в каналі змінюються від 0,53 м до 1,25 м, а середні глибини по профілям не перевищують 0,91 м, середня площа поперечних перерізів дорівнює $S_{\text{сер}} = 16,3 \text{ м}^2$. Середня глибина за перерізами зменшується впродовж каналу по мірі наближення до лиману, а ширина каналу суттєво збільшується (до 37 м на поперечному перерізі № 4), що свідчить про розмивання і обвалення стінок каналу, оскільки

пластиковим шпунтом укріплені стінки лише перших 200 м каналу від наносотримуючої споруди. Аналіз «Правил експлуатації гідротехнічної споруди «З'єднувальний канал Тилігульський лиман-Чорне море», оновлених у 2024 році Державним регіональним проектно-вишукувальним інститутом «УКРПВДЕН ДІПРОВОДГОСП» (м. Одеса), показав, що сучасний стан каналу не відповідає проєктним вимогам і за фактом унеможливає його експлуатацію. У відповідності з конструктивними рішеннями, після реконструкції з'єднувального каналу відмітка його дна повинна підтримуватись на позначці мінус 2,11 м БС (що відповідає його глибині 2,0 м), а всередині приймального ковша морської наносотримуючої споруди - мінус 2,61 м БС. При замуленні приймального ковша до відмітки дна каналу (мінус 2,11 м БС) рух води по каналу у бік лиману повинен припинятися.

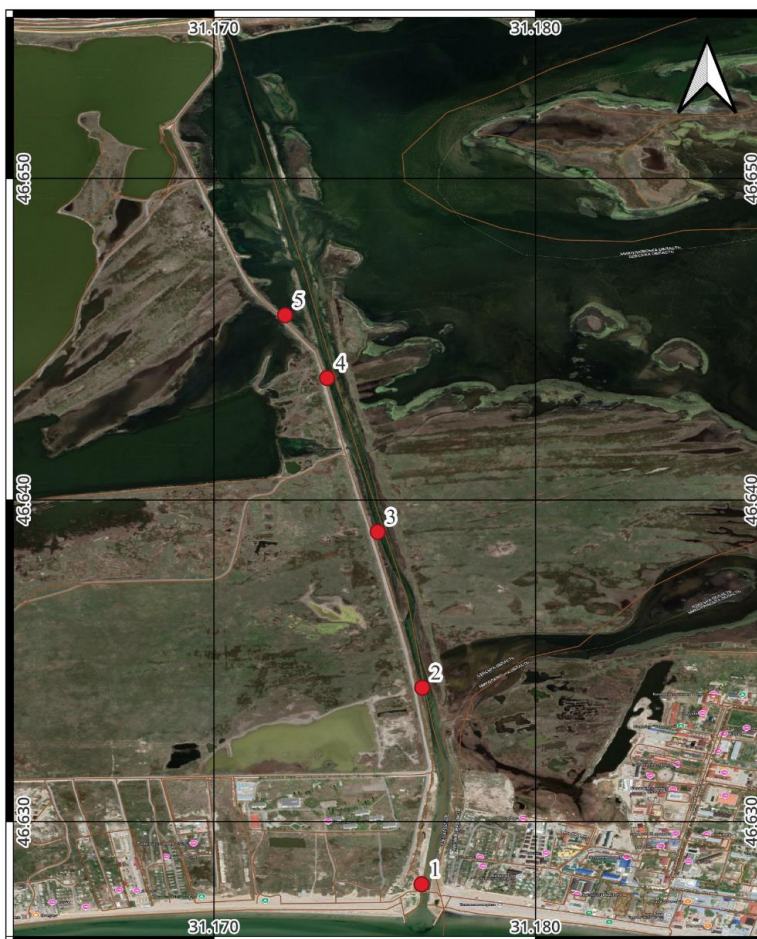


Рис. 2- Станції проведення промірних робіт в каналі «море-лиман» 25.06.2025 р.

Fig. 2 – Survey stations for channel measurements in the «sea-estuary» channel on 25.06.2025

Таблиця 1 - Основні морфометричні характеристики поперечних перерізів каналу

Table 1 - Main morphometric elements of the channel cross-sections

Поперечний переріз, №	Ширина русла В, м	Середня глибина $h_{\text{сер}}$, м	Максимальна глибина h_{max} , м	Площа поперечного перерізу S , м ²	Довжина змоченого периметру P , м	Гідравлічний радіус R , м
1	22,5	0,61	0,74	13,7	23,2	0,59
2	20,3	0,91	0,97	18,5	24,1	0,77
3	20,8	0,75	0,94	15,6	21,2	0,74
4	37	0,47	1,25	17,3	37,5	0,46
5	53	0,31	0,53	16,6	53,0	0,31

Отже, сучасні глибини в з'єднувальному каналі, виміряні наприкінці червня 2025 р., були в декілька разів меншими за проєктні. Більш того, протягом літа спостерігалось значне обміління каналу на ділянці прилеглої до шлюзу-регулятора через інтенсивне занесення каналу піском, який надходив до нього транзитом через майже повністю заповнений приймальний ківш морської наносотримуючої споруди. При проєктній глибині каналу 2,0 м і ширині 23 м, площа поперечного перерізу каналу повинна становити 46 м², тобто бути в 2,8 рази більшою, ніж та, що була виміряна у 2025 році.

Суттєве занесення каналу піском і його обміління відбувалось в період з 23.07.25 р. по 27.08.25 р. (рис. 3). За відсутності днопоглиблювальних робіт, станом на 19.11.25 р. робоча ширина каналу в районі наносотримуючої споруди зменшилась більш ніж вдвічі. Зменшенню глибин в каналі і його інтенсивному занесенню сприяло значне

зниження рівня моря у серпні-вересні (на 0,2 м порівняно з весняними місяцями).

Додатковим антропогенним фактором, який негативно вплинув на водообмін лиману з прилеглою частиною моря, стало будівництво у 2025 році на вході з'єднувального каналу «море-лиман» до лиману, замість старого мостового переходу через канал, який не заважав вільному водообміну, нового – у вигляді 10 частково занурених у воду труб діаметром 140 см (рис. 4). Труби покладені на бетону основу. Навіть за високого рівня води в морі труби заповнюються лише до половини, а за низького рівня моря труби майже повністю осушуються. Зокрема, у вересні 2025 р. найбільш низько закладені центральні труби були заповнені водою лише на 35 см від їхнього нижнього краю. Ця споруда значно погіршила можливості водообміну лиману з морем, а також створила значні перешкоди для сезонної міграції риб каналом. Окрім того, її конструкція робить безглуздим поглиблення каналу до проєктних позначок дна у майбутньому.



Рис. 3 - Занесення піском каналу і наносотримуючої споруди на ділянках прилеглих до шлюзу-регулятору станом на 27.08.2025 р.

Fig. 3 – Sand deposition in the channel and the sediment-retaining structure in areas adjacent to the sluice regulator as of 27.08.2025



Рис. 4 - Побудований у 2025 році мостовий перехід через сполучний канал «море-лиман» на вході до лиману станом на 24.09.2025 р.

Fig. 4 – Bridge crossing over the «sea-estuary» connecting channel at the estuary entrance, constructed in 2025, as of 24.09.2025

Як було показано в [3, 7] дефіцит річного прісного водного балансу Тилігульського лиману в сучасних кліматичних умовах складає 35 млн. м³/рік. Для його компенсації і запобігання обмілінню лиману необхідно його поповнення морською водою. Але постійне надходження до лиману разом з морською водою додаткової кількості солей, без забезпечення належної промивки (водооновлення) лиману шляхом різноспрямованого водообміну з морем, призводить до виникнення багаторічної тенденції підвищення солоності його вод (засолення лиману).

Одна з головних цілей реконструкції з'єднувального каналу полягала у запобіганні підвищенню солоності вод в лимані шляхом збільшення інтенсивності його зовнішнього водообміну з прилеглою ділянкою моря [33]. Дослідження мінливості солоності води у лимані протягом 2025 року показали, що ця мета не була досягнута (рис. 5). Після поновлення роботи з'єднувального каналу у 2018 році, солоність води в центральній частині лиману стабілізувалася на рівні 28-29 ‰, але не зменшилась. У північній мілководній частині лиману солоність води більша за 30 ‰ через інтенсивне випаровування і значне зменшення стоку р. Тилігул (рис. 5) внаслідок кліматичних змін, що відбуваються.

На рис. 6 показаний просторовий розподіл солоності вод на акваторії Тилігульського лиману у квітні-червні 2015 і 2025 рр., який свідчить про те, що збільшення солоності води у вказаний період відбулося в усіх частинах лиману. Причиною цього є відсутність або суттєве зменшення стоку р. Тилігул, оскільки в 2025 році найбільші значення солоності води, на відміну від 2015 р., спостерігались в північній частині лиману.

Характеристики гідрохімічного режиму. Моніторинг лиману, який виконувався у 2000-2010 рр. та 2012-2015 рр., показав значні відмінності в гідрохімічних умовах мілководної північної і глибокої південної частин лиману: концентрації речовин фосфору в північній частині, куди впадає річка Тилігул, були вищими, ніж в південній, для мінеральних речовин азоту спостерігалась зворотна тенденція. Була відзначена тенденція зростання вмісту речовин фосфору у 2012-2015 рр. порівняно з 2000-2010 рр. (табл. 2). Характерною особливістю гідрохімічних умов лиману були надвисокі концентрації $R_{\text{мін}}$ і $R_{\text{орг}}$, високі концентрації кремнію і низький вміст $N_{\text{мін}}$. Було встановлено, що лиман – це так звана «фосфорна водойма», в якій створення первинної продукції органічної речовини автотрофами лімітується низькими концентраціями $N_{\text{мін}}$. Гідрохімічний моніторинг лиману також показав, що донні

відкладення лиману накопичують відмерлу органічну речовину і є «депо» мінеральних речовин азоту та фосфору. Концентрації в порових розчинах донних відкладень мінеральних і органічних речовин майже на

порядок перевищують їх концентрації в воді лиману. Іонний обмін на геохімічній межі «вода-донні відкладення» збагачує водну товщу лиману речовинами N і P, тобто призводить до посилення евтрофікації екосистеми [6].

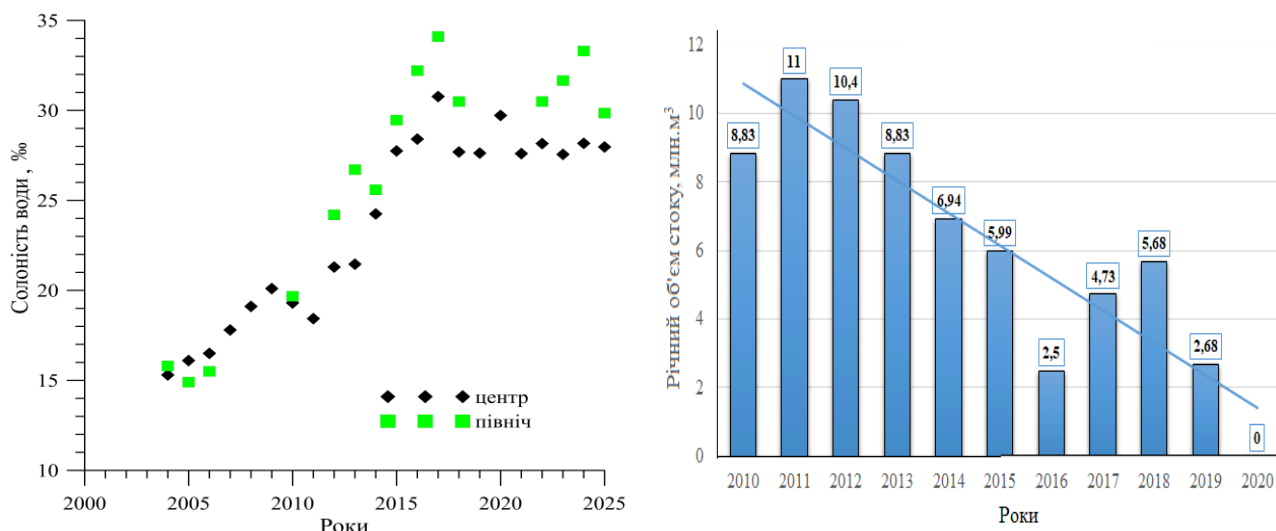


Рис. 5 - Багаторічні зміни середньої солоності вод, ‰, в центральній і північній частинах лиману, визначеної в літні місяці року (червень-вересень) в період 2000-2025 рр. (ліворуч) та річних об'ємів стоку р. Тилігул, млн.м³, (праворуч) за даними спостережень в створі смт Березівка

Fig. 5 – Long-term changes in average water salinity (‰) in the central and northern parts of the estuary, measured during the summer months (June–September) over the period 2000–2025 (left), and annual runoff volumes of the Tyligul River (million m³) (right), based on observations at the Berezivka station

Моніторинг лиману у 2025 р. показав подальше збільшення концентрації у воді мінеральних речовин фосфору, мінеральних та органічних речовин азоту, яке відбувалось після реконструкції з'єднувального каналу «море-лиман». Таки зміни свідчать, що евтрофування водойми триває. Щомісячний моніторинг лиману зафіксував стабільно надвисокі концентрації фосфатів і органічного фосфору (рис. 7). Максимальні концентрації фосфатів відзначали у серпні в південній частині лиману (3,5 ГДК за фосфатами для водойм рибогосподарського призначення [34]).

Основною формою азоту у лимані, як і раніше, був азот органічний. Протягом року у балансі речовин азоту в екосистемі лиману він становив від 90 до 97 %. Основною формою мінеральних речовин азоту був азот амонійний – форма азоту, яка найбільш легко засвоюється мікро- та макрофітами. Дефіцит мінеральних та надлишок органічних речовин азоту свідчать про

порушення природного циклу синтезу та деструкції органічної речовини у екосистемі.

Порівняння даних, отриманих у 2025 рр., з даними авторів, отриманими до початку реконструкції з'єднувального каналу в періоди 2000-2010 та 2012-2015 рр., свідчить (див. таблицю 2) про зростання в водах лиману мінеральних та органічних речовин азоту, фосфору, а також, як і до реконструкції з'єднувального каналу, про незбалансованість екосистеми за вмістом основних біогенних елементів – азоту і фосфору. В збалансованих природних системах $N_{\min} : P_{\min}$ повинно бути близьким до співвідношення Редфільда – 16:1 в атомних одиницях (молях) або 7,2:1 в масових одиницях [35]. Однак у лимані влітку 2025 р. воно становило 1:7. Це свідчить про лімітацію мінеральним азотом первинного продукування органічної речовини автотрофами і домінування у складі органічного азоту фракцій, стійких до біохімічного окислення, оскільки відомо, що

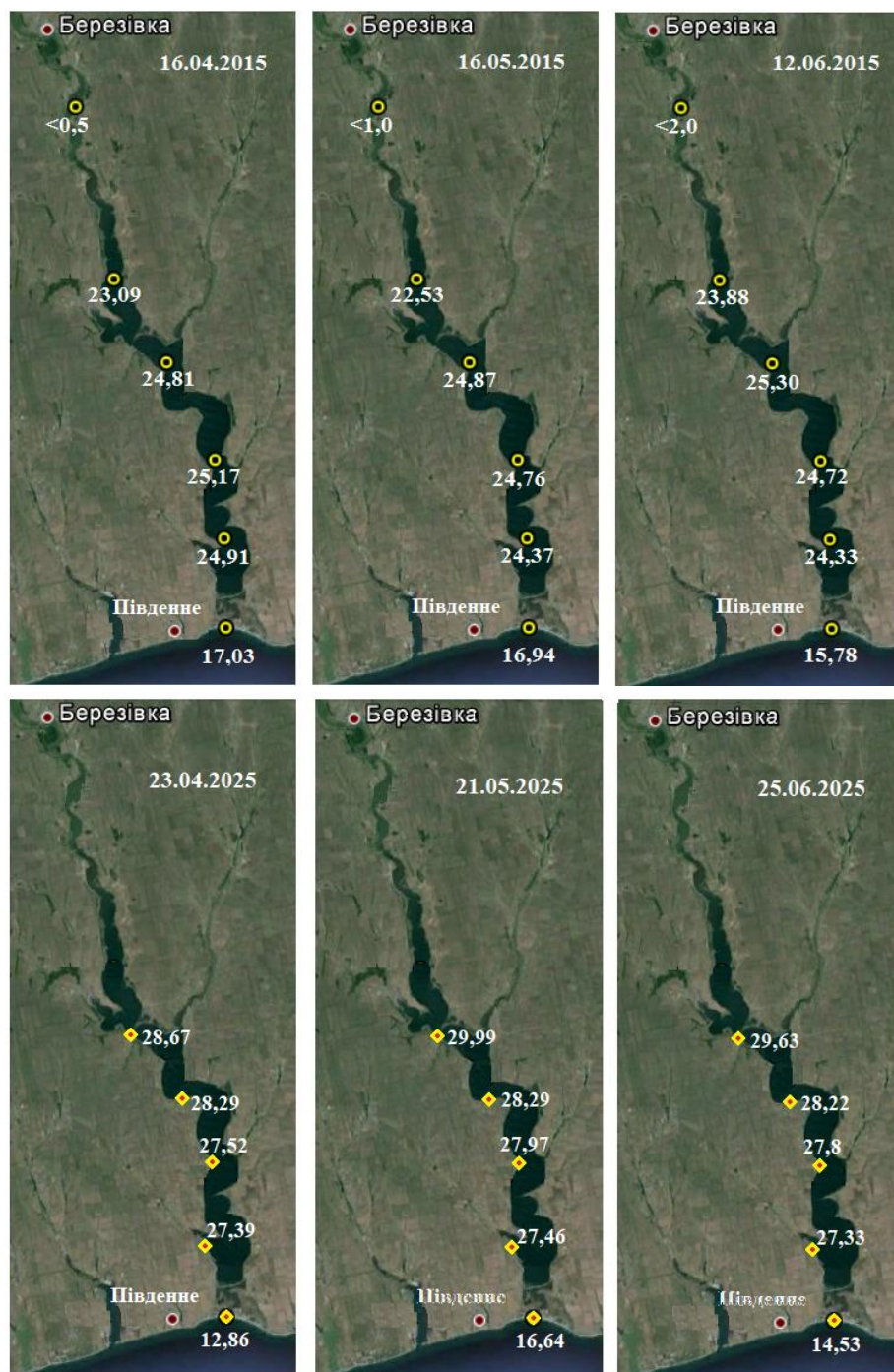


Рис. 6 – Просторова мінливість солоності, ‰, вод поверхневого шару Тилігульського лиману у квітні-червні 2015 р. (зверху) і 2025 р. (знизу)

Fig. 6 – Spatial variability of surface-layer water salinity (‰) in the Tylihul Estuary in April-June 2015 (top) and 2025 (bottom)

швидкість мінералізації органічного азоту значно нижча, ніж органічного фосфору.

Накопичення в екосистемі Тилігульського лиману біогенних речовин і особливо речовин фосфору пов'язано з їх постійним надходженням з антропогенних джерел на узбережжі лиману (з сільгоспугідь, фермерських господарств і т. ін.),

із донних відкладень (особливо в період розвитку придонної гіпоксії), з екскрементів птахів, колонії яких мешкають у південній частині лиману, та з інтенсивною втратою води на випаровування влітку разом з недостатньою промивкою лиману морською водою в

результаті різноспрямованого водообміну через сполучний канал «море-лиман».

На початку серпня 2025 р. в пробах води взятих з човна на окремій станції в південній

частині лиману, прилеглої до з'єднувального каналу, були виявлені ознаки розвитку гіпоксії на глибинах 5, 10 м, де насиченість вод киснем була 44 і 42 %, відповідно.

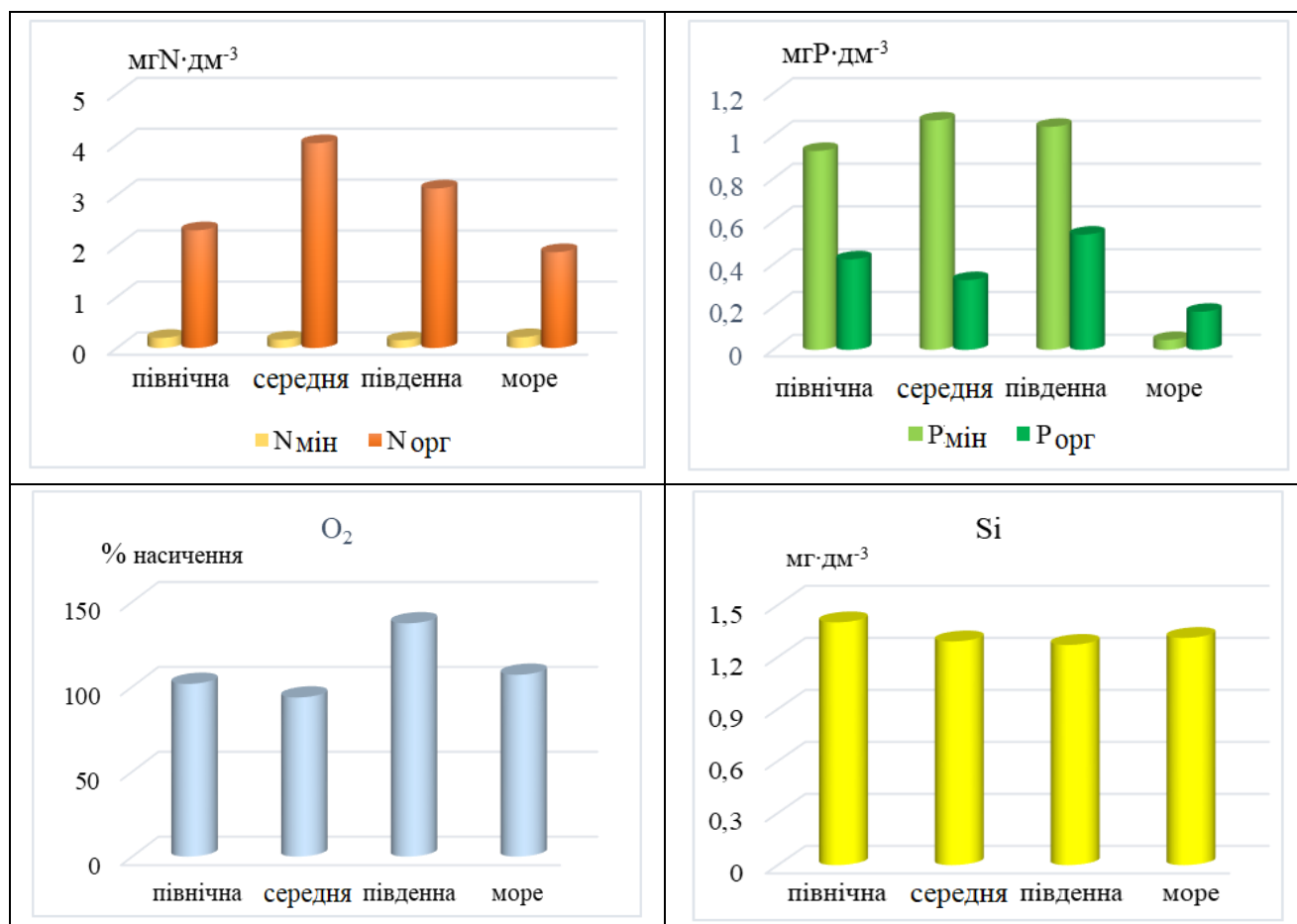


Рис. 7 - Середньорічні значення концентрацій мінерального та органічного азоту (N_{мін}, N_{орг}), фосфору (P_{мін}, P_{орг}), % насичення вод киснем (O₂), кремнію (Si) у водах Тилігульського лиману (в північній, середній, південній частинах) та на прилеглому узмор'ї у 2025 р.

Fig. 7 – Mean annual values of mineral and organic nitrogen (N_{min}, N_{org}) and phosphorus (P_{min}, P_{org}) concentrations; percentage of water saturation with oxygen (O₂), silicon (Si) in the Tylihul Estuary (in its northern, central and southern parts) and in the adjacent coastal waters in 2025

Таблиця 2 - Середні значення концентрацій кремнію (Si), мінерального і органічного азоту (N_{мін}, N_{орг}), фосфору (P_{мін}, P_{орг}), в Тилігульському лимані влітку 2000-2010, 2012-2015, 2025 рр.

Table 2 - Average values of concentrations of mineral and organic nitrogen (N_{min}, N_{org}), phosphorus (P_{min}, P_{org}), silicon (Si) in the Tylihul Estuary in summer for 2000-2010, 2012-2015, and 2025

Період, рік	N _{МІН}	N _{ОРГ}	P _{МІН}	P _{ОРГ}	Si, мг·дм ⁻³	N _{МІН} : P _{МІН}
	мгN·дм ⁻³		мгP·дм ⁻³			
2000-2010	0,054	2,36	0,456	0,254	1,40	1:8
2012-2015	0,036	3,03	0,564	0,312	2,50	1:16
2025 (V-IX)	0,151	3,90	1,083	0,437	1,54	1:7

Характеристики фітопланктону. Дослідження фітопланктону Тилігульського лиману показали, що у 2025 році в лимані відзначали 20 видів, представників п'ятох

таксонів мікроводоростей (Cyanoprokaryota, Chlorophyta, Bacillariophyta, Dinophyta, Euglenophyta). В основному, 65 % складали діатомові, 20 % дінофітові та 15 % решта водоростей. Масовими видами були дінофітові *Prorocentrum cordatum* (Ostenfeld) J.D.Dodge, *P. micans* Ehrenberg, *Heterocapsa triquetra* (Ehrenberg) F.Stein та діатомові *Skeletonema*

costatum (Greville) Cleve, *Pseudosolenia calcaravis* (Schultze) B.G.Sundström. У складі фітопланктону 80 % складали морські види і по 10 % приходилося на солонуватоводні і прісноводні. Необхідно відмітити, що у 2001-2003 рр. і в 2015 р. дане співвідношення було схожим – 79, 12,3, 8,7% та 78 і 22%, відповідно [30, 32] (рис. 8).

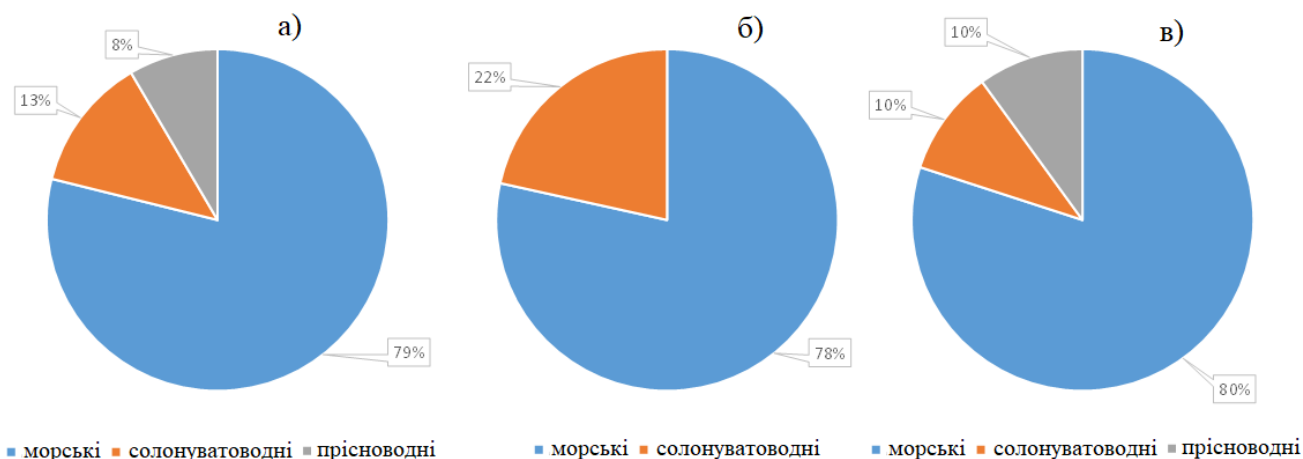


Рис. 8 – Розподіл мікроводоростей планктону по відношенню до солоності в Тилігульському лимані у 2001-2003 рр. (а), 2015 р. (б) та у 2025 р. (в) за літературними і власними даними

Fig. 8 – Distribution of planktonic microalgae in relation to salinity in the Tylihul Estuary in 2001-2003 (a), 2015 (b), and 2025 (c) (literature and own data)

Протягом 2025 р. спостерігали три піки розвитку біомаси фітопланктону в лимані (рис. 9): в березні, липні та вересні. Весняний пік пов'язаний з «цвітінням» води викликаним дінофітовою водорістю *Heterocapsa triquetra*, з чисельністю $1,058 \cdot 10^6$ кл.л⁻¹ та біомасою 7606,03 мг·м⁻³. Влітку «цвітіння» води викликала дінофітова *Prorocentrum cordatum*, з чисельністю $3,080 \cdot 10^6$ кл.л⁻¹ та біомасою 4427,18 мг·м⁻³. Восени значна біомаса фітопланктону (6202,21 мг·м⁻³) в лимані формувалась за рахунок розвитку крупноклітинної дінофітової *Prorocentrum micans*, з максимальною чисельністю $0,671 \cdot 10^6$ кл.л⁻¹. Необхідно відмітити, що «цвітіння» мікроводоростей відбувалось на станції Кордон (верхів'я лиману).

Кількісний розвиток фітопланктону в лимані у зимово-весняний період був значно нижчий, ніж на прибережній станції в прилеглий частини Чорного моря (рис. 9), однак влітку тенденція була зворотною, окрім серпня, коли в морі значну біомасу ($1514,262$ мг·м⁻³) створювала велико-клітинна діатомова *Pseudosolenia calcaravis*.

Для порівняння, у 2015 році (до реконструкції каналу), в лимані і на прибережних морських

станціях було виявлено 65 видів мікроводоростей, які в основному були представлені діатомовими (44) та дінофітовими (12 видів). Масовими видами були діатомові водорості. Біомаса зафіксована майже однакова в північній і центральній частинах лиману ($1,618$ – $1,955$ г·м⁻³), а в його південній частині – у 5 разів нижчою ($0,358$ г·м⁻³).

У 2025 р. розподіл мікроводоростей планктону в акваторії лиману був теж досить нерівномірний (рис. 10). Взимку найвища біомаса фітопланктону була в центральній і південній частинах лиману. Навесні мікроводорості в акваторії лиману розподілялись майже рівномірно. Однак, влітку і восени тенденція змінилась: біомаса фітопланктону в північній частині перевищувала показники в центральній і південній у 150 разів - влітку, і в 60 разів - восени, що пов'язано з явищем «цвітіння» води саме у північній частині лиману.

Загалом, у 2025 р. біомаса фітопланктону в лимані була подібною до значень у попередні роки (рис. 11).

Отже, порівняно з 2015 роком (до реконструкції каналу), в лимані відбулось зменшення видового різноманіття

фітопланктону у 3 рази, в основному з переважанням морських видів і повністю змінився комплекс домінуючих видів, з масовими дінофітовими і діатомовими водоростями. При цьому кількісні показники

фітопланктону Тилігульського лиману, практично не змінилися. В той же час, протягом 2025 р. зафіксовані два випадки «цвітіння» води, збудником яких були дінофітові мікроводорості – *Heterocapsa triquetra* та *Prorocentrum cordatum*.

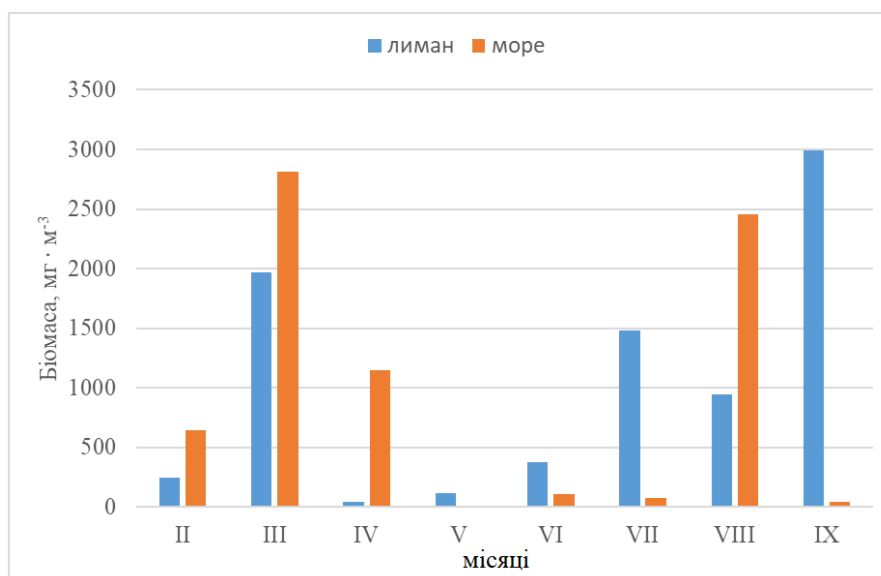


Рис. 9 – Внутрішньорічна динаміка середньої біомаси фітопланктону в Тилігульському лимані та прилеглій частині Чорного моря у 2025 р.

Fig. 9 – Intra-annual dynamics of average phytoplankton biomass in the Tylihul Estuary and the adjacent part of the Black Sea in 2025

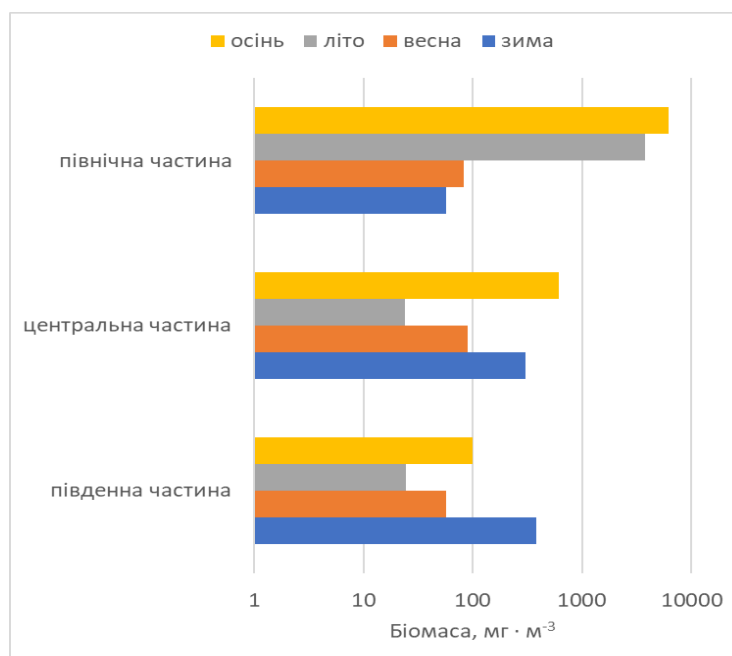


Рис. 10 – Розподіл біомаси фітопланктону в акваторії Тилігульського лиману у 2025 р.

Fig. 10 – Spatial distribution of phytoplankton biomass in the water area of the Tylihul Estuary in 2025

Характеристики макрофітобентосу. В результаті досліджень макрофітобентосу у прибережній зоні Тилігульського лиману на

глибинах від 0 до 0,5 м, в 2025 році було виявлено 39 видів водоростей і один вид морських трав *Zostera noltii* Hornem.

Найбільшою кількістю видів представлені відділи Chlorophyta і Rhodophyta – по 14 видів. До бурих водоростей відноситься 6 видів і до

синьозелених – 5 видів. Найбільше видів мають роди *Ulva* (6 видів), *Cladophora* (5 видів) та *Ceramium* (4 види).

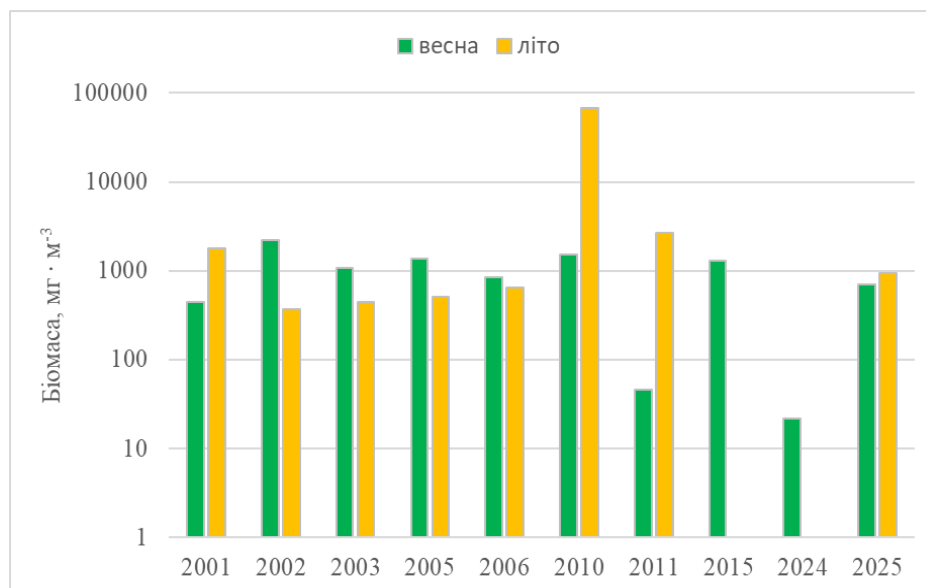


Рис. 11 – Багаторічна динаміка біомаси фітопланктону Тилігульського лиману у 2001-2025 рр.: за літературними [32, 36] і власними даними

Fig. 11 – Long-term dynamics of phytoplankton biomass in the Tylihul Estuary in 2001–2025: based on published [32, 36] and original data

Найбільші біомаса і різноманіття макрофітобентосу (35 видів) відмічені в південній частині лиману на станції Кошари, де наявний твердий природний субстрат на глибинах від урізу води до 1,5 м. На цій станції проводяться дослідження протягом багатьох років, що дало змогу провести порівняння сучасних даних щодо стану макрофітобентосу з ретроспективними, зокрема, з роками до реконструкції каналу.

Визначена сезонна динаміка макрофітобентосу – найбільша кількість видів відмічена в березні (28 видів), коли наявні сезонні бурі водорості. Найбільші показники біомаси макрофітобентосу зафіксовані в літні місяці (червень-липень), коли масового розвитку набувають представники зелених і червоних водоростей (рис. 12).

Проведене порівняння біомаси фітобентосу в літній сезон на станції Кошари за 6 років до реконструкції каналу (2010-2015 рр.) і 6 років після реконструкції (2020-2025 рр.) показало, що за останні роки біомаса фітобентосу зросла майже в два рази (рис. 13).

У відношенні до солоності, серед виявлених в 2025 році в лимані видів макрофітобентосу до морських відноситься 46 %, до солонуватоводних-морських – 40 %, до

солонуватоводних – 6,5%, до прісноводно-солонуватоводних – 7,5 %. Відсоткове співвідношення морських і солонувато-морських видів залишилося на рівні 1990-2004 рр. (45 % і 38 % відповідно) [22].

У відношенні до сапробності води макрофіти поділялися на мезосапроби – 49 %, олігосапроби – 23 % і полісапроби – 28 %. В порівнянні з даними 1990-2004 рр. [22] частка полісапробів зросла більше ніж в два рази, що свідчить про підвищення органічного забруднення лиману.

Одним з видів – індикаторів екологічного стану Тилігульського лиману є багаторічна бура водорість цистозіра (*Gongolaria barbata* (Stackh.) Kütz.), локальна популяція якої наявна в південній частині лиману. В 80-х роках минулого століття, у зв'язку з евтрофікацією, даний вид повністю зник з морських водойм Дунай-Дніпровського узбережжя. Єдиним місцем в даному регіоні, де впродовж останніх 30-років продовжився розвиток цистозіри, стала південна частина Тилігульського лиману. Під час досліджень 2025 р. було встановлено, що стан популяції *G. barbata* перебуває в задовільному стані: таломи досягали 50-60 см у довжину, їхня середня біомаса складала 5,3 кг·м⁻² (максимальна біомаса – 8,55 кг·м⁻²). Показники біомаси цистозіри в 2025 році досить

високі і перевищують показники, які були до відкриття каналу. Так, в період 2008-2010 рр. спостерігалось пригнічення популяції цистозіри в Тилігульському лимані, в ці роки її середня біомаса становила $1,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$. З 2011 року відбувалося відновлення популяції, і в 2013 р. відмічений пік розвитку – середня біомаса фітоценозів цистозіри на глибинах від 0,3 до 1 м склала $3,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ при максимумі до $7,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$. Середня біомаса за 2008-2015 рр. складала

близько $2,00 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$, що більш ніж в 2,5 рази менше показника 2025 року. Вищенаведене свідчить, що популяція *G. barbata* в Тилігульському лимані схильна до міжрічної мінливості, і за несприятливих умов (кліматичні фактори, зниження прозорості води в результаті скаламучення глинистих домішок, та т.ін.) відбувається пригнічення її розвитку, що призводить до зменшення показників чисельності і біомаси.

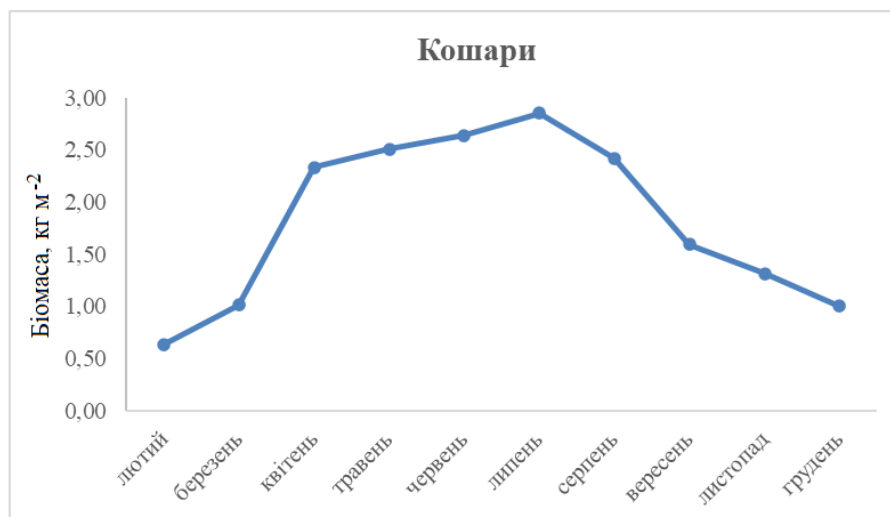


Рис. 12 - Сезонна динаміка біомаси макрофітобентосу, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$, на станції Кошари

Fig. 12 - Seasonal dynamics of macrophytobenthos biomass, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, at the Koshary station

Талом цистозіри є додатковим субстратом для розвитку епіфітних макроводоростей, зокрема рідкісних. Під час досліджень було виявлено 4 види водоростей, які включені до Червоної книги України. Серед них бурі водорості *Punctaria latifolia* Grev. та *Pylaiella littoralis* (L.) Kjellm., зелена водорість *Cladophora dalmatica* Kütz., червона водорість із мікроскопічним таломом *Stylonema alsidii* (Zanardini) K.M.Drew. Всі наведені види відмічені і в обростаннях таломів *G. barbata*, що робить її угруповання в Тилігульському лимані ще більш цінними і такими, що потребують збереження і подальшого моніторингу.

Характеристики іхтіофауни. Дослідження складу іхтіофауни показали, що реконструкція з'єднувального каналу у 2016-2017 роках не призвела до збільшення видового розмаїття іхтіофауни лиману, яке залишилося на рівні значно нижчому, ніж на початку 2000-х років. З 2003 по 2013 рр. у лимані було знайдено 39 представників іхтіофауни [29, 31]. З 2014 по 2017 рр., у період підвищення значень солоності вод в лимані, видовий список скоротився більше,

ніж в півтора рази. У цей час було знайдено всього 24 види риб, що належали до 18 родів та 12 родин [29]. В 2019 - 2025 рр., після проведення реконструкції з'єднувального каналу, дослідженнями ІМБ НАНУ в уловах зареєстровано також 24 види риб (13 родин). При цьому у 2025 р. в осінніх уловах ставних неводів кількість зареєстрованих видів риб знизилася до 12, порівняно з 19 у 2024 р.

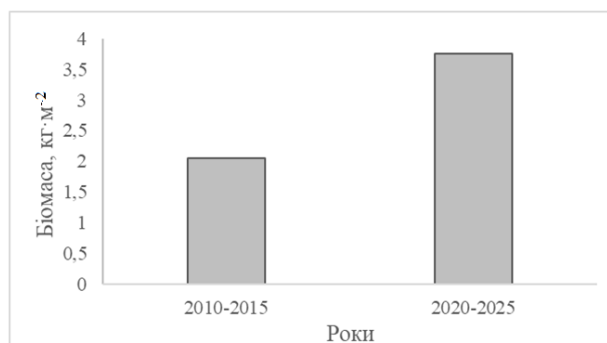


Рис. 13 - Біомаса фітобентосу, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$, Тилігульського лиману на станції Кошари в роки до реконструкції каналу (2010-2015 рр.) та після (2020-2025 рр.)

Fig. 13 - Biomass of phytobenthos, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, in the Tylilul Estuary at the Koshary station in the pre-reconstruction period (2010-2015) and post-reconstruction period (2020-2025) of the channel

Порівняння розмірно-масових показників основних промислових видів риби в осінніх уловах ставних неводів демонструє зниження їх середніх розмірів у 2025 р. по відношенню до 2015 р.: атерини - на 0,3 см, хамси - на 1,4 см, бичка зеленчака - на 4,0 см. Відповідно нижчими були й середні значення маси риби - на 0,1 г, 1,75 г та 25,2 г (рис. 14). Чинниками, які

негативно впливали на розвиток іхтіофауни в лимані у 2025 р., стали погіршення кормових умов для нагулу риби через значне зменшення рівня води в лимані восени, обміління прибережних ділянок із макроводоростями і їх гниття в південній частині лиману, де здійснювався промисел. Імовірно, що додатковим фактором, який спричинив погіршення зростання риби в лимані у 2025 р., стало будівництво мостового переходу у верхній частині каналу на місці старого автомобільного мосту.

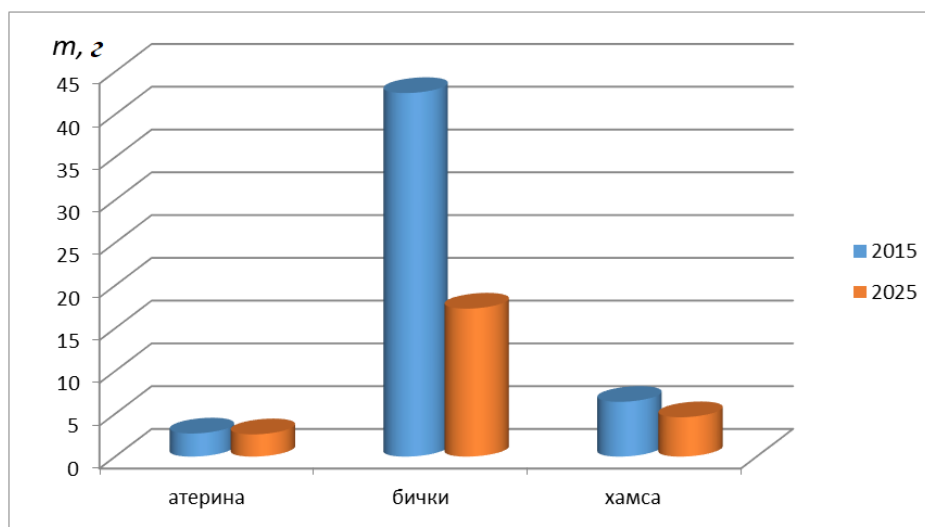


Рис. 14 – Зниження середньої маси (в грамах) основних промислових видів риби в осінніх уловах ставних неводів у Тилігульському лимані від 2015 р. до 2025 р.

Fig. 14 – Decrease in the average weight (g) of major commercial fish species in autumn catches from stationary seine nets in the Tylilul Estuary from 2015 to 2025

Динаміка уловів у Тилігульському лимані останніми роками представлена на рис. 15. Різкі коливання величини уловів викликані переважно причинами суб'єктивного характеру. Припинення промислу у 2016 та 2017 роках було спричинено закриттям каналу на реконструкцію. Перший рік після початку функціонування каналу - 2018, був цілком вдалим, улови за рахунок доброго заходу атерини склали 345 т. У 2019 р. промисел у лимані знову було припинено через те, що Держрибгентство не затвердило ліміти вилову водних біоресурсів у лимані. Надалі почалися зволікання з видачою дозволів рибалкам на лов у об'єктах природно-заповідного фонду - обох регіональних ландшафтних парках в межах Одеської та Миколаївської областей. Далі позначився вплив реформування рибної галузі та проведення аукціонів на право лову водних біоресурсів. Після цього вилов у лимані не перевищував 72 т,

а у 2024 р. скоротився до 18 т. Максимальний за останні роки вилов кефалі у водоймі спостерігався у 2023 році - 29,6 т, проте вже у 2024 р. він знизився до 0,76 т. У 2025 р. спостерігалось деяке зростання уловів, насамперед за рахунок збільшення вилову атерини. Загальний вилов риби в лимані склав 72 т, у тому числі чорноморської кефалі - 5,3 т.

Таким чином, можна констатувати, що середні улови в період після проведення реконструкції каналу скоротилися в 3-4 рази порівняно з попередніми роками.

4. ВИСНОВКИ

Моніторинг гідроекологічного стану Тилігульського лиману за комплексом гідрологічних, гідрохімічних і гідробіологічних характеристик його екосистеми, виконаний у 2025 році показав, що реконструкція з'єднувального каналу «море-лимани», проведена

в основному в період 2016-2017 рр., не досягла своєї мети, оскільки не відбулось зменшення солоності вод в лимані в результаті інтенсифікації зовнішнього різноспрямованого водообміну лиману з морем. Збільшилися концентрації мінерального і органічного азоту та фосфору у водах лиману порівняно з періодом до реконструкції каналу. Все це свідчить про те, що лиман залишається недостатньо проточною водоймою.

Основні особливості гідрохімічного режиму лиману залишилися такими ж, які були до реконструкції каналу: лиман є так званою «фосфорною» водоймою, в якій за стехіометричним співвідношенням переважає мінеральний фосфор і створення первинної продукції органічної речовини автотрофами може лімітуватись низькими концентраціями мінерального азоту.

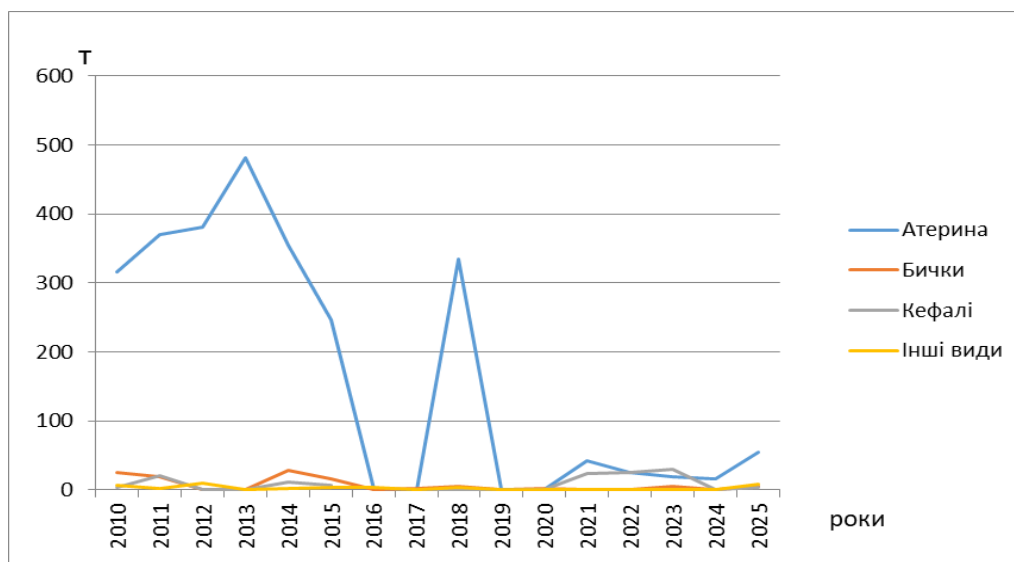


Рис. 15 - Динаміка уловів в Тилігульському лимані (в тонах) у 2010 – 2025 рр.

Fig. 15 - Dynamics of fish catches in the Tylihul Estuary (in tonnes) in 2010 – 2025

У відношенні до гідробіологічних характеристик, станом на 2025 рік, порівняно з періодом до реконструкції каналу, відбулось зменшення видового різноманіття фітопланктону у три рази, в основному з переважанням морських видів, і повністю змінився комплекс домінуючих видів. Протягом 2025 р. зафіксовані два випадки «цвітіння» води, збудником яких були дінофітові мікроводорості – *Heterocapsa triquetra* та *Prorocentrum cordatum*, що свідчить про високу трофність лиману. Стан іхтіофауни та рибопродуктивність Тилігульського лиману не покращилися і залишаються нестабільними. Спостерігається певне зниження видового розмаїття та уловів риби.

Головна причина не досягнення мети, з якою здійснювалась реконструкція з'єднувального каналу «море-лиман» в період 2016-2017 рр., полягає у невідповідності проєктним вимогам морфометричних характеристик з'єднувального каналу, недотриманні встановлених правил експлуатації каналу, що не забезпечило збільшення зовнішнього різноспрямованого

водообміну лиману з морем (промивку водойми). Додатковим негативним чинником, який значно погіршує різноспрямований водообмін лиману з морем, стало будівництво у 2025 році несанкціонованого природоохоронними службами нового мостового переходу через з'єднувальний канал.

В той же час слід відзначити, що до позитивних наслідків реконструкції каналу можна віднести відносну стабілізацію рівня солоності вод Тилігульського лиману в останні роки, хоча і на досить високих значеннях. Також позитивним можна вважати те, що практично не змінилися кількісні показники фітопланктону Тилігульського лиману; зберіглася популяція бурої водорості цистозіри в південній частині лиману і збільшилися показники її біомаси.

Для поліпшення сучасного гідроекологічного стану Тилігульського лиману рекомендується:

1) знести побудований у 2025 році без належної екологічної експертизи мостовий перехід через з'єднувальний канал «море-лиман», який погіршує водообмін лиману з морем та заважає проходженню міграції риби. У

разі господарської необхідності існування такої транспортної споруди має бути побудований повноцінний міст, який не перекриватиме русло каналу;

2) проведення ремонтного днопоглиблення з'єднувального каналу разом з наносотримуючою морською спорудою, з доведенням їх морфометричних характеристик (зокрема, глибини) до величин, передбачених проектом реконструкції з'єднувального каналу «Тилігульський лиман-Чорне море», укріпленням стінок каналу;

3) безумовне дотримання Правил експлуатації гідротехнічної споруди «З'єднувальний канал Тилігульський лиман-Чорне море»

ПОДЯКА

Дослідження здійснено в Інституті морської біології НАН України в рамках виконання НДР за фінансуванням НАН України “Визначення оптимальних сценаріїв управління гідроекологічним режимом екотонів українського сектору Азово-Чорноморського регіону із застосуванням методів сценарного математичного моделювання (на прикладі Тилігульського лиману)” (2025–2027 рр., номер державної реєстрації №0125U002058).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Водні ресурси та гідроекологічний стан Тилігульського лиману: монографія / Одеський державний екологічний університет; під ред. Ю.С. Тучковенко, Н.С. Лободи. Одеса: ТЕС, 2014. 276 с.
- Gubanova O., Tuchkovenko Y., Khokhlov V., Stepanenko S., & Baggett S. (2015). The Management Story of Tyligul'skyi Liman Lagoon. *Coastal Lagoons in Europe: Integrated Water Resource Strategies* / Edited by A.I. Lillebø, P. Stålnacke, G.D. Gooch. London : IWA Publishing, 2015. Pp. 87–96.
- Тучковенко Ю.С., Хохлов В.М., Лобода Н.С., Кушнір Д.В., Серга Е.М. Вплив змін клімату на гідрологічний і гідроекологічний режими лиманів північно-західного Причорномор'я: монографія / Одеський державний екологічний університет. Одеса: ОДЕКУ, 2022. 202 с.
- Розенгурт М.Ш. Гидрология и перспективы реконструкции природных ресурсов одесских лиманов: монография. Киев : Наукова думка, 1974. 217 с.
- Тучковенко Ю.С., Адобовский В.В., Тучковенко О.А. Характеристика изменчивости термохалинных условий Тилигульского лимана в современный период. *Вісник Одеського державного екологічного університету*. 2014. 17. С. 197–204.
- Тучковенко Ю.С., Богатова Ю.И., Тучковенко О.А. Гидрохимический режим Тилигульского лимана в современный период. *Вісник Одеського державного екологічного університету*, 2015, 19. С. 126–133.
- Тучковенко Ю.С., Хохлов В.М., Лобода Н.С. Вплив змін клімату на водний баланс квазізакритих лиманів північно-західного Причорномор'я. *Український гідрометеорологічний журнал*, 2022, 29. С. 32–47. <https://doi.org/10.31481/uhmj.29.2022.03>
- РД 52.10.243-92 Настанова з хімічного аналізу морських вод. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77071 (дата звернення: 15.04.2026)
- РД 52.24.420-2006 «Біохімічне споживання кисню у водах. Методика виконання вимірювання склянковим методом». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=76349 (дата звернення: 15.04.2026)
- Таблицы растворимости кислорода в морской воде. Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. 165 с.
- Moncheva S., Part B. Black Sea Monitoring Guidelines. Phytoplankton. 2014. URL: http://www.noelsporttraits.com/index.php?main_page&id=28&chapter=50 (дата звернення: 04.03.2026)
- Брянцева Ю.В., Лях А.М., Сергеева А.В. Расчет объемов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Черного моря. Севастополь, 2005. 25 с.
- Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Vol. 1. Cyanoprokaryota, Euglenophyta, Chrysophyta, Xanthophyta, Raphidophyta, Phaeophyta, Dinophyta, Cryptophyta, Glaucocystophyta and Rhodophyta. Eds. P. Tsarenko, S. Wasser and E. Nevo. Rugell: Gantner Verlag, 2006. 713 p.
- Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Vol. 2. Bacillariophyta. Eds. P.M. Tsarenko, S. Wasser, E. Nevo. Rugell: Gantner Verlag, 2009. 413 p.
- Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Vol. 3. Chlorophyta. Eds. P. Tsarenko, S. Wasser, E. Nevo. Rugell: Gantner Verlag, 2011. 510 p.
- Електронна база WoRMS (World Register of Marine Species). URL: www.marinespecies.org (дата звернення: 04.03.2026)
- Зинова А.Д. Определитель зелёных, бурых и красных водорослей южных морей СССР. М.-Л.: Наука, 1967. 397 с.
- Калугина-Гутник А.А. Фитобентос Черного моря. К.: Наукова думка, 1975. 248 с.
- Minicheva G., Afanasyev D., Kurakin A. (2020). *Black Sea Monitoring Guidelines. Macrophytobenthos*. Dnipro: Seredniak T.K., 2020. 81 p.
- Guiry M.D., Guiry G.M. *AlgaeBase*. World-wide electron. publ. Nat. Univ. Ireland, Galway, 2026. URL: <https://www.algaebase.org> (дата звернення: 05.02.2026)
- IPNI. *International Plant Names Index*. Publ. Int. Roy. Bot. Gardens Kew, Harvard Univ. Herbaria & Librar. and Austral. Nat. Herbar, 2026. URL: <http://www.ipni.org>. (дата звернення: 05.02.2026)
- Ковтун О.А. Фитобентос Тилигульского лимана (Черное море, Украина). LAP Saarbrücken, Deutschland: Lambert Academic Publishing, 2012. 360 с.
- Midway, S.R., Hasler, C.T., Chakrabarty, P. (eds.). *Methods for Fish Biology*. 2nd ed. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society, 2022, 824 p.
- Методика збору і обробки іхтіологічних та гідробіологічних матеріалів. К.: Інститут рибного господарства, 1998. 67 с.
- Методичні рекомендації з організації інвентаризації, оцінки, моніторингу водно-болотного угіддя міжнародного значення та складання інформаційного опису / За заг. ред. В. Демченка, О. Петрович. Херсон: Видавництво «ОЛДІ-ПЛЮС», 2020. 228 с.
- Комплексне управління водними ресурсами

Тилигульського лиману та його гідроекологічним станом в умовах антропогенного впливу і кліматичних змін: Звіт з НДР заключний (наук. кер.: Ю.С. Тучковенко), ДР № 0113U000696. Од. держ. еколог. ун-т. Одеса, 2014. 375 с.

27. Характеристика сучасного гідрохімічного та гідрологічного режиму лиману, вироблення рекомендацій щодо його поліпшення в складі ТЕР по об'єкту: «Розробка проектно-кошторисної документації з реконструкції з'єднувального каналу між Тилигульським лиманом і Чорним морем на території Комінтернівського району Одеської області». Звіт про науково-дослідну роботу заключний (наук. кер. Ю.С. Тучковенко) ДР №0115U006850/ Од. держ. еколог. ун-т. Одеса, 2015. 267 с.
28. Характеристика сучасного гідробіологічного режиму лиману, вироблення рекомендацій щодо підтримання біологічного різноманіття та хорошого екологічного стану в складі ТЕР по об'єкту: «Розробка проектно-кошторисної документації з реконструкції з'єднувального каналу між Тилигульським лиманом і Чорним морем на території Комінтернівського району Одеської області». Звіт про науково-дослідну роботу заключний (наук. кер. Г.Г. Мінічева)/ Інститут морської біології НАН України. Одеса, 2015. 122 с.
29. Снігирьов С.М., Бушуєв С.Г., Черніков Г.Б., Ковтун О.О., Заморов В.В., Куракін О.П. Іхтіофауна Тилигульського лиману на початку XXI століття. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2017. 7(4). С. 35-45. https://doi.org/10.15421/2017_84
30. Северо-западная часть Черного моря: биология и экология: монография / В.В. Адобовский, Ю.И. Богатова и др.; ред. Ю.П. Зайцев, Б.Г. Александров, Г.Г. Миничева; Одесский филиал Ин-та биологии южных морей НАН Украины. Киев: Наукова думка, 2006. С. 358-371.
31. Шекк П.В. Характеристика стану іхтіофауни і перспективи рибогосподарського використання Тилигульського лиману. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Біологія*. 2015. 3 (68). С. 54-60.
32. Снігирьова А.О., Богатова Ю.І. Фітопланктон Тилигульського лиману в умовах зміни режиму солоності. *Морський екологічний журнал*. 2020. 2. С. 31-38. <https://doi.org/10.47143/1684-1557/2020.2.04>
33. Тучковенко Ю.С., Кушнір Д.В., Лобода Н.С. Оценка влияния условий водообмена с морем на изменчивость уровня и солёности воды в Тилигульском лимане. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. 16. С. 232-241. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.30>
34. Гранично допустимі значення показників якості води для рибогосподарських водойм. Загальний перелік ГДК і ОБРВ шкідливих речовин для води рибогосподарських водойм: [№12-04-11 чинний від 09-08-1990]. Київ : Міністерство рибного господарства, СРСР. 1990. 45 с.
35. Redfield A.C., Ketchum B.H., Richerds F.A. The influence of organisms on the composition of sea water. *The Sea*. Ed. M. N. Hill. 1963. №4, 2. P. 26-49.
36. Зотов А.Б., Богатова Ю.И. Влияние изменчивости содержания биогенных веществ на структуру фитопланктона Тилигульського лимана в весенне-летний период. *Науковий Вісник Ужгородського університету*. 2012. 32. С. 24-34.

REFERENCES

1. Tuchkovenko, Yu.S., Loboda, N.S. (eds). (2014). *Vodni resursy tahidroekologichnyi stan Tylihulskoho lymanu [Water resources and hydroecological conditions of the Tylihulskiy Liman Lagoon]*. Odessa State Environmental University. Odessa: TES Publ. (in Ukr.)
2. Gubanova O., Tuchkovenko Y., Khokhlov, V., Stepanenko, V., & Baggett, S. (2015). The Management Story of Tylihulskiy Liman Lagoon. In: Lillebø, A.I., Stålnacke, P. & Gooch, G.D. (eds.), *Coastal Lagoons in Europe: Integrated Water Resource Strategies*. London, UK: IWA Publishing, pp. 87–96.
3. Tuchkovenko, Yu. S., Khokhlov, V. M., Loboda, N. S., Kushnir, D. V., Serga, E. M. (2022). *Vplyv zmin klimatu na hidrolohiichni i hidroekologichni rezhymy lymaniv pivnichno-zakhidnoho Prychornomoria [Climate change impact on hydrological and hydroecological regimes of lagoons on the North-Western Black Sea coast]*. In: Tuchkovenko, Yu.S. (ed.). Odessa: Odessa State Environmental University. (in Ukr.)
4. Rozengurt, M.Sh. (1974). *Gidrologiya i perspektivy rekonstruktsii prirodnykh resursov odesskikh limanov [Hydrology and prospects for the reconstruction of the natural resources of the Odessa limans]*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russ.).
5. Tuchkovenko, Y.S., Adobovskiy, V.V., Tuchkovenko, O.A. (2014). [Characteristics of variability in thermohaline conditions of the Tylihulskiy Liman lagoon in the present period]. *Bulletin of Odessa State Environmental University*, 17, pp. 197-204. (in Russ)
6. Tuchkovenko, Yu.S., Bogatova, Yu.I., Tuchkovenko, O.A. (2015). [Contemporary hydrochemical regime of Tylihulskiy liman]. *Bulletin of Odessa State Environmental University*, 19, pp. 126-133. (in Russ)
7. Tuchkovenko, Y., Khokhlov, V., Loboda, N. (2022). [Climate change impact on water balance of quasi-closed lagoons in the North-Western Black Sea coast]. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 29, pp. 32-47. (in Ukr.) <https://doi.org/10.31481/uhmj.29.2022.03>
8. RD 52.10.243-92. (1992). *Nastanova z khimichnoho analizu morskykh vod [Marine Water Analysis manual]*. (in Russ). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77071 (Accessed: 10.03.2026)
9. RD 52.24.420-2006. (2006). *Biokhimichne spozhyvannia kysniu u vodakh. Metodyka vykonannya vymiryuvannya skliankovym metodom [Biochemical oxygen demand in waters. Methodology for measuring by the glass method]*. (in Russ). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=76349 (Accessed: 10.03.2026)
10. *Tablicy rastvorimosti kisloroda v morskoj vode [Tables of oxygen solubility in seawater]* (1976). Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russ)
11. Moncheva S., Parr B. (2014). *Black Sea Monitoring Guidelines. Phytoplankton*. Available at: http://www.noelsportraits.com/index.php?main_page&id=28&chapter=50 (Accessed: 10.03.2026)
12. Bryantseva, Yu.V., Lyakh, A.M., Sergeeva, A.V. (2005). *Raschet ob'emov i ploshchadey poverkhnosti odnokletochnykh vodorosley Chernogo morya [Calculation of volumes and surface areas of unicellular algae of the Black Sea]*. Sevastopol, 2005. (in Russ)
13. Tsarenko, P., Wasser, S. and Nevo, E. (eds). (2006). *Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography. Vol. 1. Cyanoprokaryota, Euglenophyta, Chrysophyta, Xanthophyta, Raphidophyta, Phaeophyta, Dinophyta, Cryptophyta, Glaucocystophyta and*

- Rhodophyta. Rugell: Gantner Verlag.
14. Tsarenko, P.M., Wasser, S., Nevo, E. (eds). (2009). *Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography*. Vol. 2. Bacillariophyta. Rugell: Gantner Verlag.
15. Tsarenko, P.M., Wasser, S., Nevo, E. (eds). (2011). *Algae of Ukraine: diversity, nomenclature, taxonomy, ecology and geography*. Vol. 3. Chlorophyta. Rugell: Gantner Verlag.
16. Electronic database WoRMS (World Register of Marine Species). Available at: www.marinespecies.org (Accessed: 18.02.2026)
17. Zinova, A.D. (1967). *Opredelitel zelyonyh, buryh i krasnyh vodoroslej yuzhnyh morej SSSR* [Identification manual of green, brown and red algae of the Southern Seas of the USSR]. Moskva-Leningrad: Nauka. (in Russ.)
18. Kalugina-Gutnik, A.A. (1975). *Fitobentos Chyornogo moray* [Phytobenthos of the Black Sea]. Kyiv: Naukova Dumka. (in Russ.)
19. Minicheva G., Afanasyev D., Kurakin A. (2020). *Black Sea Monitoring Guidelines. Macrophytobenthos*. Dnipro: Seredniak T.K.
20. Guiry M.D., Guiry G.M. (2026). *AlgaeBase*. World-wide electron. publ. Nat. Univ. Ireland, Galway. Available at: <https://www.algaebase.org> (Accessed: 05.02.2026)
21. IPNI (2026). *International Plant Names Index*. Publ. Int. Roy. Bot. Gardens Kew, Harvard Univ. Herbaria & Librar. and Austral. Nat. Herbar. Available at: <http://www.ipni.org>. (Accessed: 05.02.2026)
22. Kovtun, O.A. (2012). *Fitobentos Tyligul'skogo limana (Chernoe more, Ukraina)* [Phytobenthos of the Tyligul Estuary (Black Sea, Ukraine)]. LAP Saarbrucken, Deutschland: Lambert Academic Publishing. (in Russ.)
23. Midway, S.R., Hasler, C.T., Chakrabarty, P. (eds.). (2022). *Methods for Fish Biology*. 2nd ed. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society.
24. Institute of Fisheries (1998). *Metodyka zboru i obrobky ikhtiologichnykh ta hidrobiologichnykh materialiv* [Methodology for collecting and processing ichthyological and hydrobiological materials]. Kyiv: Institute of Fisheries.
25. Demchenko, V., Petrovych O. (eds.) (2020). *Metodychni rekomendatsii z orhanizatsii inventaryzatsii, otsinky, monitorynhu vodno-bolotnoho uhiddia mizhnarodnoho znachennia ta skladannia informatsiinoho opysu* [Methodological recommendations for organizing inventory, assessment, monitoring of wetlands of international importance and compiling an information description]. Kherson: Publishing House "OLDI-PLUS"
26. Tuchkovenko, Yu.S. (scient. chief). (2014). *Kompleksne upravlinnia vodnymi resursamy Tyligul'skoho lymanu ta yoho hidroekologichnym stanom v umovakh antropohenoho vplyvu i klimatichnykh zmin: Zvit pro NDR zakliuchnyi. DR № 0113U000696* [Integrated management of water resources in the Tyligul'skiy Liman Lagoon and its hydroecological conditions in the context of anthropogenic influence and climate change: Final Report. SR 0113U000696]. Odessa State Environmental University. Odessa. (in Ukr.)
27. Tuchkovenko, Yu.S. (scient. chief). (2015). *[Description of the modern hydrochemical and hydrological conditions of the lagoon, development of recommendations for its improvement. Part of technical-economic calculation on the project "Development of designing estimates for reconstruction of the connecting channel between the Tyligul'skiy Liman Lagoon and the Black Sea in the area of Kominternivskiy district of Odesa Region": Final Report. SR 0115U006850]*. Odessa State Environmental University. Odessa. (in Ukr.)
28. Minicheva, G.G. (scient. chief). (2015). *[Characteristics of the modern hydrobiological regime of the lagoon, development of recommendations for maintaining biological diversity and good ecological condition. Part of technical-economic calculation on the project "Development of designing estimates for reconstruction of the connecting channel between the Tyligul'skiy Liman Lagoon and the Black Sea in the area of Kominternivskiy district of Odesa Region": Final Report]*, Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine, Odessa. (in Ukr.)
29. Snigirov, S., Bushuev, S., Chernikov, G., Kovtun, O., Zamorov, V., Kurakin, A. (2017). [Ichthyofauna of the Tyligul'skiy Lyman (Estuary) in the beginning of XXI century]. *Ukrainian Journal of Ecology*, 7(4), 35–45. (in Ukr.). https://doi.org/10.15421/2017_84
30. Zaitsev Yu.P., Aleksandrov B.G., Minicheva G.G. (Eds.) (2006). *Severo-zapadnaja chast' Chernogo morja: biologija i jekologija* [The North-Western part of the Black Sea: Biology and Ecology]. Kiev: Naukova Dumka, 2006, pp. 358–370. (in Russ.)
31. Shekk, P.V. (2015). [Characteristics of the state of ichthyofauna and the prospects of fishery use of the Tyligul'skiy liman]. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Biology*, 3 (68), pp. 54–60.
32. Snigirova, A.A., Bogatova, Yu.I. (2020). [Phytoplankton of Tyligul'skiy liman in conditions of change of salt regime]. *Marine ecological journal*, 2, pp. 31–38 (in Ukr.). <https://doi.org/10.47143/1684-1557/2020.2.04>
33. Tuchkovenko Y.S., Kushnir D.V., Loboda N.S. (2015). [Estimation of the influence of water exchange with the sea conditions on the water level and salinity variability in the Tyligul'skiy Liman lagoon]. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 16, pp. 232–241. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.30> (in Russ.)
34. Ministry of Fisheries, USSR. (1990). *Hranychno dopustymi znachennia pokaznykiv yakosti vody dlja rybohospodarskykh vodoim. Zahalnyi perelik HDK i OBRV shkidlyvykh rehovyn dlja vody rybohospodarskykh vodoim: (№12-04-11 chynnyi vid 09-08-1990)* [Maximum permissible values of water quality indicators for fishery reservoirs. General list of MPC and OBRV of harmful substances for water of fishery reservoirs: (№12-04-11 effective from 09-08-1990)]. (in Ukr.)
35. Redfield, A.C., Ketchum, B.H., Richerds, F.A. (1963). The influence of organisms on the composition of sea water. *The Sea*. Ed. M. N. Hill, No 4, 2, pp. 26–49.
36. Zotov, A.B., Bogatova, Yu.I. (2012). [Influence of the variability of organic matter content on phytoplankton abundance of the Tyligul'skiy liman during the spring-summer period]. *Scientific Bulletin of Uzhgorod University*, 32, 24–34. (in Russ.)

CHANGES IN THE HYDROECOLOGICAL STATUS INDICATORS OF THE TYLIHUL ESTUARY AFTER THE RECONSTRUCTION OF THE SEA-CONNECTING CHANNEL

**Yu. S. Tuchkovenko, M. O. Martyniuk, Yu. I. Bogatova, O. P. Garkusha,
S. G. Bushuiev, K. S. Kalashnik**

*Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine,
37 Pushkinska Str., Odesa, 65048, Ukraine
tuch2001@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>*

In 2016-2017, the connecting channel “Tylihul Estuary - Black Sea” was reconstructed with the aim of improving the hydroecological status of the estuary by increasing its external water exchange with the sea. This article is devoted to analyzing changes in the hydroecological status of the estuary based on a set of hydrological, hydrochemical, and hydrobiological characteristics of its ecosystem that occurred after the reconstruction of the connecting channel. The comparative analysis is based on data obtained from monthly hydroecological monitoring of the estuary during 2025, as well as retrospective data on its hydroecological characteristics collected prior to the channel reconstruction.

It was established that the reconstruction of the connecting channel did not achieve its main objective, as no decrease in water salinity in the estuary occurred as a result of intensified bidirectional water exchange with the sea. Concentrations of mineral and organic nitrogen and phosphorus in the estuary waters increased compared to the period before the reconstruction. Phytoplankton species diversity decreased, with a predominance of marine species; fish species diversity and catches in the estuary also declined. The state of the ichthyofauna and fish productivity of the estuary did not improve and remain unstable. The main reason for this is the discrepancy between the actual morphometric characteristics of the channel and the design specifications, non-compliance with established operational rules, and additionally, the construction of a new bridge crossing over the channel, which hindered water exchange between the estuary and the sea. By the end of June 2025, the average cross-sectional area of the channel was 2.8 times smaller than the design value, and the average depth was 2.2 times less than the design specification (2.0 m and 0.91 m, respectively).

The general conclusion is that the reconstruction of the “sea-estuary” connecting channel carried out in 2016-2017 did not achieve its intended goal. Recommendations are provided for measures to improve the current hydroecological status of the Tylihul Estuary.

Keywords: Northwestern Black Sea region, Tylihul Estuary, hydroecological status, sea-estuary connecting channel, consequences of reconstruction.

*Подання до редакції : 18. 02. 2026
Надходження остаточної версії : 22. 04. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026*

УДК 502:504

МОНЕТИЗАЦІЯ ОКРЕМИХ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ (КОРИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ) ПРИРОДНИХ СИСТЕМ ПІВНІЧНО- ЗАХІДНОГО ШЕЛЬФУ ЧОРНОГО МОРЯ

М. Ю. Дьяченко, Т. А. Сафранов

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
вул. Всеволода Змієнка, 2, 65000, Одеса, Україна,
maksymdiachenko@yahoo.com, safranov@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0003-0928-5121>

Екосистемні послуги – це всі корисні ресурси та вигоди, які сучасне людство може отримати від природи (як матеріальні, так і нематеріальні вигоди від абіогенних і біогенних складових різноманітних природних систем). Монетизація екосистемних послуг має важливе значення для покращення ситуації у сфері охорони довкілля, виступаючи основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень, оскільки дозволяє визначити збитки від їх нерационального використання, обґрунтувати економічну ефективність інвестицій у природоохоронну діяльність, зіставити витрати та вигоди від наданих послуг, а також розрахувати величину компенсаційних платежів. Водночас низка вчених проти «присвоєння цінника» багатствам природи, вважаючи, що цінність природи нескінченна і не може мати грошового висловлювання, а оцінювати її окремі елементи просто абсурдно. Величина природно-ресурсного потенціалу, що є елементом суспільного (національного або регіонального) багатства, кількісно може бути представлена лише через вартісні показники у так званих загальнодержавних кадастрових або світових цінах. покриву міста, територія якого характеризується досить різноманітними ґрунтово-геохімічними умовами.

Метою роботи є монетизація окремих екосистемних послуг (корисних властивостей) природних систем північно-західного шельфу Чорного моря.

Робота ґрунтується на аналізі опублікованих даних вітчизняних і зарубіжних науковців, а також на матеріалах власних досліджень. Авторами охарактеризовані окремі екосистемні послуги (корисні властивості) природних систем північно-західного шельфу Чорного моря, а також зроблено спробу їх економічної оцінки на підставі існуючої інформації щодо ринкових цін.

Незважаючи на орієнтовану оцінку вартості деяких екосистемних послуг (корисних властивостей) природних систем північно-західного шельфу Чорного моря, вони показують істотне їх значення для розвитку економіки приморських регіонів України. Вартісна оцінка деяких екосистемних послуг (корисних властивостей) природних систем в умовах війни пов'язана з певними труднощами, але навіть виходячи з мінімальних значень, проблеми їх відновлення та перспектив їх засвоєння можуть бути істотним внеском в економічний потенціал держави. Максимальна вартість припадає на ресурси вуглеводневої сировини, зокрема на запаси природного газу, але оскільки розвідано лише 4% прогнозних запасів вуглеводневої сировини, то у майбутньому вартісна оцінка вуглеводневої сировини може бути істотно підвищена, а тому розвідування та експлуатація покладів вуглеводневої сировини в післявоєнний період є важливим завданням забезпечення енергетичної безпеки держави. Надати економічну оцінку деяких екосистемних послуг (підтримування, регулювання, культурні) є складним завданням, але вони також є дуже важливими складовими природно-ресурсного потенціалу північно-західного шельфу Чорного моря.

Ключові слова: північно-західний шельф Чорного моря, природні системи, екосистемні послуги, корисні властивості, монетизація.

1. ВСТУП

Природні екосистеми забезпечують людство різноманітними вигодами (послугами), без яких неможливо функціонування галузей економіки, а також фізичне та емоційне здоров'я людей. Зі збільшенням чисельності населення, темпів урбанізації та індустріального розвитку зростає і

попит на екосистемні послуги (ЕСП). Водночас багато природних екосистем світу перебуває у занепаді або під загрозою зникнення, екологічні катастрофи можуть призвести до суттєвого погіршення якості життя людей, загострення

конкуренції за природні блага та вплинути на умови ведення бізнесу.

Варто зазначити, що витоки сучасної концепції ЕСП сформувалися наприкінці 1970-х років; початок їй поклали наукові дослідження з розробки корисних функцій природних систем як послуг з метою підвищення суспільного інтересу до збереження біологічного різноманіття [1]. У 1990-х роках питання економічної оцінки ЕСП знайшли своє відображення в роботах Р. Констанзи і Г. Дейлі [2]. Розробці теорії ЕСП сприяло формуванню наукових підходів до повної економічної оцінки природних ресурсів та послуг, що надаються ними, а також проведення фундаментальних міжнародних досліджень у цьому напрямку [3].

Оцінити ефективність використання суспільством ЕСП, запобігаючи їх деградації, можна за допомогою економічної оцінки. На даний час процедура економічної оцінки ЕСП включає чотири основні етапи: 1) ідентифікацію ЕСП; 2) визначення економічної цінності ЕСП; 3) визначення одержувача вигоди від ЕСП; 4) формування механізму платежів (компенсації) за ЕСП.

Найбільш повною з точки зору комплексного підходу до оцінки ЕСП є методика визначення їх загальної економічної цінності (*Total Economic Value*) [4], що дозволяє розрахувати економічну оцінку вартості біологічного різноманіття та заповідних територій.

Нині є два підходи щодо економічних оцінок ЕСП. Перший підхід має на увазі необхідність постійно вдосконалювати методологію економічних оцінок, визначати цінність ЕСП, створювати механізми включення цих оцінок до економічної політики держави. Другий підхід заперечує економічні оцінки ЕСП, пояснюючи це тим, що цінність природних екосистем нескінченна, та робити оцінки окремих їх елементів абсурдно.

Важливо, що низка вчених проти «присвоєння цінника» багатствам природних систем. Вони вважають, що цінність природних систем нескінченна і не може мати грошового висловлювання, а оцінювати її окремі складові просто абсурдно. Інші, навпаки, вважають, що це необхідно (Б. Коммонер, 1974; С.Н. Бобильов, В.М. Захаров, 2009, 2014; А.А. Поспелова, 2011; Т.А. Акімова, 2012 та ін.). Етичний аспект оцінки та плати за екосистемні послуги розглянуто у роботі [5].

Величина природно-ресурсного потенціалу (ПРП), що є елементом суспільного

(національного або регіонального) багатства, кількісно може бути представлена лише через вартісні показники у так званих загальнодержавних кадастрових або світових цінах. Наприклад, можна визначити гідроенергетичний потенціал річки, кількість водних і гідробіологічних ресурсів та їх вартісні показники, але неможливо надати вартісну оцінку естетичності річкових ландшафтів, водоспадів та інших унікальних природних куточків. На думку М.Ф. Реймерса (1994), оцінювати природу за вартістю її матеріальних багатств – це все одно, що оцінювати картини великих художників за їх метражем або витратами на полотно і фарбу. Проте, такий підхід є домінуючим тому, що їх монетизація, тобто їх оцінка у грошовому еквіваленті, допомагає зрозуміти людям те, наскільки важливим у їхньому житті є збереження корисних властивостей біогенної та абіогенної природних складових природних систем.

Аналізуючи представлені точки зору, зазначимо, що економічна оцінка ЕСП (корисних властивостей) природних екосистем має важливе значення для покращення ситуації у сфері охорони довкілля, виступаючи основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Саме економічні оцінки ЕСП дозволяють визначити збитки від їх нерационального природокористування, обґрунтувати економічну ефективність інвестицій у природоохоронні заходи, зіставити витрати та вигоди від наданих ЕСП, а також розрахувати величину компенсаційних платежів. На основі економічної оцінки ЕСП розробляються алгоритми підвищення прибутковості та стійкості розвитку територій та корпорацій. Показники економічної цінності відображають прибутковість використання запасів природних ресурсів, прогноз їх виснаження і деградації, а також вплив цих процесів на стійкість розвитку території та бізнесу.

Сучасна міжнародна практика все більше орієнтується на інтеграцію ЕСП у сферу управління природними ресурсами. Це виявляється у розвитку так званих природо-орієнтованих рішень (*Nature-Based Solutions* – *NBS*), які одночасно сприяють досягненню екологічних, економічних та соціальних цілей. Наприклад, у Європейському Союзі природо-орієнтовані рішення стали ключовим компонентом кліматичної політики, зокрема у

контексті адаптації до змін клімату, захисту від повеней, покращення якості води та відновлення деградованих земель [6].

Будь-який збиток, завданий природним екосистемам (системам), тягне за собою прямі економічні наслідки, які, як правило, недооцінюються. Перетворивши вартість природного капіталу з абстрактного поняття на конкретні цифри, зрозумілі для економіки та для суспільства, створюються фактичний матеріал, на основі якого можна приймати точніші та ефективніші з точки зору витрат рішення. Наприклад, сьогодні існує проблема кризи біологічного різноманіття, незважаючи на те, що людство є основним одержувачем від численних і багатосторонніх ЕСП. Проте всі біологічні види продовжують зникати і, відповідно, природний капітал скорочується. Ціна таких втрат відчувається на локальному і регіональному рівнях, але може залишатися непоміченою на державному та міжнародному рівнях, оскільки справжня вартість природного капіталу не враховується при прийнятті рішень та визначенні показників, вона не відображається у системах обліку та у ринкових цінах. Поняття «екосистемних послуг», тобто благ, які ми отримуємо від природних екосистем, допомагає оцінити ці блага більш явно. Це поняття є ключовим у новому підході до оптимізації природокористування. Оскільки ЕСП поділяються на надання корисних продуктів, регулятивні функції, культурні та допоміжні послуги, ці блага можуть бути як прямими, так і непрямими, як матеріальними, так і нематеріальними. Поводячись марнотратно, можна «промотати» ці блага, які іноді становлять навіть більшу цінність для майбутніх поколінь, ніж для нас, що суперечить стратегії сталого розвитку.

Грошова оцінка вартості ЕСП є важливим кроком в алгоритмі оцінки. Щоб зрозуміти та оцінити вплив скорочення біологічної різноманітності або зміни стану природної екосистеми на послуги, потрібні попередньо зібрані фактичні дані. Найкращих результатів вдається досягти, коли економічна оцінка відноситься не до всієї природної екосистеми в цілому, а до деякої її зміни, причому в контексті конкретної екологічної політики. В даний час є великий масив різноманітних емпіричних даних щодо вартості широкого кола ЕСП у різних регіонах світу та в різних соціально-економічних умовах. Однак ці дані розподілені нерівномірно. У науковій літературі все ще є суттєві прогалини, наприклад, щодо морських екосистем. Послуги з

надання корисних продуктів (продуктів харчування, волокна та води) та деякі культурні послуги (туризм та рекреація) представлені ширше, ніж регулятивні послуги (регулювання клімату та водного режиму). Чисельна оцінка дозволяє визначити відносну значимість різних ЕСП, особливо тих, які є предметом купівлі-продажу на традиційних ринках. «Вартість прямого використання», пов'язана з ЕСП постачання, має найбільше значення для людей, які проживають безпосередньо в природних екосистемах або поблизу них, але навіть ця вартість неповною мірою враховується, особливо якщо йдеться про блага, що не мають ринкової ціни. Вартість непрямого використання, пов'язаного з ЕСП регулювання та підтримування, враховується ще рідше. У той самий час, результати багатьох досліджень свідчать, що вартість ЕСП досягає цілком значимої, а в деяких випадках і дуже істотної величини стосовно рівня доходу у цій місцевості чи економічної вигоди від альтернативного використання земель. Все більше даних вказує на те, що регулятивні послуги найчастіше роблять найбільший внесок у загальну економічну вартість. Оцінки вартості ЕСП, особливо які стосуються вигоди, одержувані місцевим населенням, найчастіше залежить від контексту.

Метою роботи є економічна оцінка окремих екосистемних послуг (корисних властивостей) природних систем північно-західного шельфу Чорного моря.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Робота ґрунтується на аналізі опублікованих даних вітчизняних і зарубіжних науковців, а також на матеріалах власних досліджень. Авторами охарактеризовані окремі екосистемні послуги (корисні властивості) природних систем північно-західного шельфу Чорного моря, а також зроблено спробу їх економічної оцінки на підставі існуючої інформації щодо ринкових цін.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Відомо, що акваторія північно-західного шельфу Чорного моря (ПЗШЧМ) є важливим районом рибальства, яке забезпечує населення країни продуктами харчування та є прибутковою статтею економіки. Масовими та цінними промисловими видами є хамса, шпрот, тюлька, оселедець, хоча раніше іхтіофауна була також представлена осетровими (*Acipenser sp.*),

кефаллю (*Mugil sp.*), скумбрією (*Scomber sp.*) та іншими цінними видами риб. Більш детальні дані щодо промислових риб наведені у багатьох опублікованих роботах, зокрема в монографії І.В. Щеголева, Е.І. Щеголева, С.І. Щеголева «Промислові риби Північно-західного Причорномор'я» (2020). У межах акваторії ПЗШЧМ основними промисловими видами риб є хамса (анчоус), шпрот, ставрида, камбала, кефаль, бички, барабулька, сарган, луфарь, скумбрія, чорноморський оселедець. Таке різноманіття зумовлено високою продуктивністю мілководних прибережних вод, де ці види риб харчуються і нерестяться. Точних сучасних даних щодо промислового вилову риби у межах ПЗШЧМ немає. Ситуація сильно залежить від квот та екологічних факторів. Хамса (анчоус) та шпрот є головними об'єктами промислу, їх обсяги складають значну частину вилову (до 90%), які видобуваються протягом всього року, але піки вилову залежать від сезону та нересту. За даними Державного агентства рибного господарства України у 2020 році в Чорному морі було видобуто 9800 т риби, у тому числі в причорноморських лиманах – 64 т, у пригирлових зонах Дунаю – 349 т, у Дніпровсько-Бузькій зоні – 2787 т тюльки, хамси, шпроту. У 2021 році вилов риби Україною в Чорному морі становив 7669 т, у причорноморських лиманах – 107 т, у пригирлових зонах Дунаю – 504 т, у Дніпровсько-Бузькій зоні – 1157 т.

Сучасний промисловий вилов риби в ПЗШЧМ залишається вкрай обмеженим через заблоковану акваторію. Для порівняння, у 2021 році (до початку повномасштабної війни) улов в українській акваторії Чорного моря за рік орієнтовано становив близько 10 тис. т. Оскільки основу промислового видобутку в регіоні складають хамса (анчоус) та шпрот, то умовно цю величину можна взяти за основу. Вартість свіжої хамси і шпрот в Україні варіюється, але переважно коливається від 2,32 грн. до 5,12 доларів США за кілограм в залежності від якості, розміру та попиту, тобто щороку у межах ПЗШЧМ можна добувати ці види риб на суму від 23,2 до 51,2 тис. доларів США, але з урахуванням того, що крім цих домінуючих видів риби в уловах можуть бути і більш цінні види промислових риб (камбала, кефаль та ін.), то вартість щорічного вилову може бути істотно збільшена.

Варто зазначити, що нагул дунайського оселедця відбувається в акваторії ПЗШЧМ, а навесні риба заходить в Дунай для нересту, а після нересту дорослі особини повертаються

назад в море. За даними Одеського центру Південного НДІ рибного господарства та океанографії протягом 1994-2010 років вилов дунайського оселедця коливалися від 18,0 до 418,0 т. При ринковій ціні дунайського оселедця 4,62 доларів США/кг вартість щорічного вилову коливається від 83,16 до 1931,2 тис. доларів США. Крім того, нагул кефалі також відбувається у прибережних морських водах з багатою кормовою базою. Приморські лимани з високим вмістом органіки, планктону і донних гідробіонтів також є важливими зонами харчування молоді кефалі навесні і влітку. Нереститься кефаль в прибережних мілководних районах на глибинах 5-20 м, де добре прогривається вода, а також в лиманах, мілководних бухтах і затоках, у гирлах річок. Внаслідок воєнної агресії росії української частини акваторії Чорного моря сучасний промисловий вилов кефалі істотно зменшився. У довоєнний період щорічний вилов кефалі складав 2500 т. Ринкова ціна кефалі коливається в діапазоні 4,65-11,63 доларів США/кг, тобто вартість щорічного вилову кефалі коливається від 116,25 до 290,75 тис. доларів США.

Незважаючи на тенденцію до перелову в цій частині Чорного моря (близько 52-65% запасів використовуються нераціонально), спостерігається відновлення деяких видів промислових риб. Наприклад, біомаса калкана з 2013 року виросла на 310% завдяки оптимізації заходів щодо управління рибним промислом.

Крім того, істотним джерелом надходження тваринного білка є розвиток аквакультури; у 2020 році було отримано 18570 т продукції аквакультури, значна частина якої припадає на прибережні екосистеми. Процеси евтрофікації зумовили розвиток гіпоксії, що, у свою чергу, спричинило загибель окремих видів риб, мідій та інших «фільтраторів» води. Тільки у 1973 – 1990 роках у межах північно-західної частини Чорного моря втрати становили 60 млн. т (зокрема 5 млн. т риби). У 1990-х роках екологічна ситуація дещо покращилася, а замори риб та двостулкових стали відбуватися рідше і на менших площах [7].

У північно-західній частині Чорного моря в морських садках, лиманах та прибережних господарствах вирощуються кефаль, камбала, лаврак (сібас), дорадо, осетрові, а також мідії, устриці, рапани. За даними [8] обсяги вилову риби та інших біологічних ресурсів в українській акваторії Чорного моря станом 01.01.2022 року склали 8305 т, а на 01.01.2023 року зменшилися до 75,8 т. Надати кількісну та вартісну оцінку аквакультури в умовах війни не представляється

можливим, але, наприклад, у 2001 році вироблялось близько 200 т мідій. Оскільки основною складовою аквакультури є мідії, то умовну вартісну оцінку аквакультури можна надати, виходячи з ринкової ціни заморожених мідій в черепашці (4,84 доларів за 1 кг). У ПЗШЧМ вона може складати 968 тис. доларів США, але з урахуванням наявності більш цінних видів аквакультури її вартість може бути істотно збільшена.

Унікальні ресурси водоростей-макрофітів, домінуючими видами серед яких є червоні водорості виду *Phyllophora crispa*. Оскільки протягом понад 50 років здійснювався інтенсивний промисловий видобуток філофори задля промислового отримання йоду і агар-агару, а також внаслідок антропогенного впливу на ПЗШЧМ, відбулося зменшення генетичної різноманітності організмів філофорного поля. Крім того, зниження прозорості води уповільнило активність процесу фотосинтезу та призвело до загибелі значної частини цих бентосних водоростей на глибинах 20 – 60 м; площа філофорного поля з 11 тис. км² у 1950-х роках скоротилася до 0,5 тис. км² у 1980-х роках, а біомаса зменшилася з 10 млн. т до 0,2 млн. т відповідно. Слід зазначити, що такі природно-антропогенні зміни призвели до деградації специфічних видів безхребетних та риб з червоним забарвленням, тобто частини «філофорного біоценозу». Це є підтвердженням регулювання взаємодії різних трофічних рівнів, що допомагає підтримувати збалансовану екологічну піраміду. Останніми роками відзначається слабо виражена тенденція до відновлення філофорного поля – ботанічного заповідника загальнодержавного значення. Внаслідок процесів евтрофікації, зменшення прозорості водної товщі та антропогенного забруднення обмежились процеси проникнення сонячного світла, що зумовило істотне погіршення умов функціонування цих бентосних водоростей до 420 тис. т у 1984 році та до 100 тис. т у 1990 році. Тому, починаючи з 1996 року видобуток філофори і її промислове використання було припинено. Конкретної фіксованої ринкової ціни на філофору з Чорного моря не публікуються, оскільки цей природний ресурс не добивається, а внаслідок воєнних дій в цей час це не представляється можливим. Якщо виходити, що сучасні запаси філофори складають навіть 200 тис. т, то виходячи з ціни в діапазоні від 1,7 від до 3,4 доларів США, вартість цієї продукції коливається від 340 до 680 тис. доларів США. Але з урахуванням тенденцій

відновлення запасів філофори в перспективі ця величина може істотно збільшена.

Таким чином, сумарна вартість деяких біологічних ресурсів ПЗШЧМ коливаються в діапазоні від 562 до 2453,05 тис. доларів США.

Важливою складовою екосистемних послуг постачання є ресурси вуглеводневої сировини. Вважається, що українська частина Чорного моря містить близько 2,3 трлн. м³ природного газу. До анексії росією Кримської автономії в 2014 р., Україна досягла певних успіхів по збільшенню добутку газу на ПЗШЧМ. На балансі ПАО «Чорноморнафтогаз» на той час знаходилося 17 родовищ, з яких 11 газових, 4 газоконденсатних і 2 нафтових. Сумарні запаси цих родовищ становили: по природному газу – 58,56 млрд. м³, по газовому конденсату – 1231 тис. т, по нафті – 2530 тис. т. У 2013 році добуток виріс до 1,65 млрд м³, а у 2015 році добуток був повинен досягти 3 млрд. м³ за рахунок завершення облаштування Одеського і Безіменного родовищ з ресурсними запасами до 35 млрд. м³ природного газу. Після анексії Криму росією Україна втратила можливість добутку вуглеводневої сировини на низці родовищ, а також продовження пошуково-розвідувальних робіт на других перспективних ділянках [9, 10].

Ринкова вартість природного газу для комерційного сектору коливається у межах 19 – 31 грн з 1 м³ (в залежності від умов постачання і котирувань на біржі), тому вартість запасів природного газу у межах ПЗШЧМ складає від 1112,64 до 1815,36 млрд. грн. Ринкова вартість газового конденсату у 2025-2026 роках коливалася в залежності від країни, якості продукту та умов угоди; наприклад, у 2010 році на Українській фондовій біржі ціна досягала 5 тис. грн/т, але з тих пор ціни сильно зросли. Оскільки немає інших даних, то з урахуванням цієї ціни вартість запасів газового конденсату в ПЗШЧМ складає 6155 тис. грн. В офіційній статистиці для розрахунку плати за користування надрами орієнтована ринкова вартість сировини нафти і газового конденсату станом на листопад 2025 року вже складала 16,421 грн/т, тобто вартість запасів газового конденсату в ПЗШЧМ може бути збільшена до 20214 тис. грн., а запаси нафти при таких цінах оцінюються в 41545 тис. грн. Вважається, що на українському шельфі Чорного моря розвідано до 30% загальних запасів вуглеводневої сировини, тобто лише 4% прогнозних запасів вуглеводневої сировини, а тому в майбутньому вартісна оцінка вуглеводневої сировини може бути істотно підвищена.

4. ВИСНОВКИ

На підставі проведених досліджень можна зробити наступні висновки: 1) незважаючи на орієнтовану оцінку вартості деяких екосистемних послуг (корисних властивостей) природних систем ПЗШЧМ, вони показують істотне їх значення для розвитку економіки приморських регіонів України; 2) вартісна оцінка деяких екосистемних послуг корисних властивостей) природних систем в умовах війни пов'язана з певними труднощами, але навіть виходячи з мінімальних значень, проблеми їх відновлення та перспектив їх засвоєння можуть бути істотним внеском в економічний потенціал держави; 3) максимальна вартість припадає на ресурси вуглеводневої сировини, зокрема на запаси природного газу, але оскільки розвідано лише 4% прогнозних запасів вуглеводневої сировини, то у майбутньому вартісна оцінка вуглеводневої сировини може бути істотно підвищена, а тому розвідування та експлуатація покладів вуглеводневої сировини в післявоєнний період є важливим завданням забезпечення енергетичної безпеки держави; 4) надати економічну оцінку деяких екосистемних послуг (підтримування, регулювання, культурні) є складним завданням, але вони також є дуже важливими складовими природно-ресурсного потенціалу ПЗШЧМ; 5) економічна оцінка екосистемних послуг (корисних властивостей) природних систем ПЗШЧМ має важливе значення для покращення ситуації у сфері охорони довкілля, виступаючи основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- De Groot. Environmental functions as unifying concept for ecology and economics. *The Environmentalist*. 1987. № 7 (2). P. 105 – 109.
- Costanza R., Daly H.E. Natural capital i sustainable development. *Conservation Biology*. 1992. Vol. 6, № 1. P. 37 – 46.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems i Human Well-being Framework для Assessment. Washington Island Press, 2003. 245 p.
- Pearce D.W., Turner R.K. Economics of Natural Resources and Environment. New York: Harvester Wheatsheaf, 1990. 378 p.
- Sanchez-Porras A., Tenorio-Arvide M.G., Peña-Moreno R.D., Sampedro- Rosas M.L., Silva-Gómez S.E. Evaluation of the Potential Change to the Ecosystem Service Provision Due to Industrialization. *Sustainability*. 2018. No 10 (9).
- European Commission. Nature-based solutions improve climate resilience. 2021. URL: https://ec.europa.eu/info/news/nature-based-solutions-improve-climate-resilience-2021-mar-02_en.
- Safranov T., Berlinsky M., Youssef el-Hadri, Slizhe M. (2022). Ocinka ekosistemnih poslug pivnichno-zahidnoyi chastini Chornogo morya: stan, problemi ta perspektivi [Assessment of ecosystem services of the northwestern part of the Black Sea: state, problems and prospects]. *Visnik HNU imeni V.N. Karazina. Seriya «Geologiya. Geografiya. Ekologiya»*, 56, pp. 255 – 263 (in Ukr).
- Poruchynska I.V., Poruchynskiy V.I., & Kutsevich A.M. (2025). Suchasnyj stan akvakultury v Ukrayini [Current status of aquaculture in Ukraine]. *Vodni bioresursi ta akvakultura*, 1(17), pp.143-149 (in Ukr).
- Safranov T.A., & Dyachenko M.Yu. (2025). Osoblivosti ekosistemnih poslug (korisnih vlastivostej) prirodnih sistem pivnichno-zahidnogo shelfu Chornogo morya [Features of ecosystem services (useful properties) of natural systems of the northwestern shelf of the Black Sea] / *Ekologiya. Dovyillya. Energozbezrehennya – 2025: kolektivna*.

REFERENCES

- De Groot. Environmental functions as unifying concept for ecology and economics (1987). *The Environmentalist*, 7 (2), pp. 105 – 109.
- Costanza R., & Daly H.E. (1992). Natural capital i sustainable development. *Conservation Biology*, 6 (1), pp. 37 – 46.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems i Human Well-being Framework для Assessment (2003). Washington Island Press.
- Pearce D.W., & Turner R.K. (1990). Economics of Natural Resources and Environment. New York: Harvester Wheatsheaf.
- Sanchez-Porras A., Tenorio-Arvide M.G., Peña-Moreno R.D., Sampedro- Rosas M.L., & Silva-Gómez S.E. (2018). Evaluation of the Potential Change to the Ecosystem Service Provision Due to Industrialization. *Sustainability*, 10 (9).
- European Commission. Nature-based solutions improve climate resilience (2021). Retrieved from: https://ec.europa.eu/info/news/nature-based-solutions-improve-climate-resilience-2021-mar-02_en.
- Safranov T., Berlinsky M., Youssef el-Hadri, & Slizhe M. (2022). Ocinka ekosistemnih poslug pivnichno-zahidnoyi chastini Chornogo morya: stan, problemi ta perspektivi [Assessment of ecosystem services of the northwestern part of the Black Sea: state, problems and prospects]. *Visnik HNU imeni V.N. Karazina. Seriya «Geologiya. Geografiya. Ekologiya»*, 56, pp. 255 – 263 (in Ukr).
- Poruchynska I.V., Poruchynskiy V.I., & Kutsevich A.M. (2025). Suchasnyj stan akvakultury v Ukrayini [Current status of aquaculture in Ukraine]. *Vodni bioresursi ta akvakultura*, 1(17), pp.143-149 (in Ukr).
- Safranov T.A., & Dyachenko M.Yu. (2025). Osoblivosti ekosistemnih poslug (korisnih vlastivostej) prirodnih sistem pivnichno-zahidnogo shelfu Chornogo morya [Features of ecosystem services (useful properties) of natural systems of the northwestern shelf of the Black Sea] / *Ekologiya. Dovyillya. Energozbezrehennya – 2025: kolektivna*.

- monografiya / Pid red. O.E. Ilyash. Poltava: Nacionalnij universitet «Poltavska politehnika imeni Yuriya Kondratyuka» (in Ukr).
10. Safranov T.A., & Diachenko M.Yu. (2025). Ecosystem Services of Natural Systems North-Western Shelf of

the Black Sea: Current Status and Problems of Use. *Advances in Science and Technology*, 162, pp. 159-165.

MONETIZATION OF CERTAIN ECOSYSTEM SERVICES (BENEFITS) OF NATURAL SYSTEMS OF THE NORTHWESTERN BLACK SEA SHELF

M. Yu. Dyachenko, T. A. Safranov

Odesa I. I. Mechnikov National University
2 V. Zmiiienka Str., 65000, Odesa, Ukraine,
maksymdiachenko@yahoo.com, safranov@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0003-0928-5121>

Ecosystem services are all the useful resources and benefits that modern humanity can receive from nature (both material and non-material benefits from abiogenic and biogenic components of various natural systems). Monetization of ecosystem services is important for improving the situation in the field of environmental protection, serving as the basis for making informed management decisions, as they allow determining the losses from their irrational use, justifying the economic efficiency of investments in environmental protection activities, comparing the costs and benefits of the services provided, and calculating the amount of compensation payments. At the same time, a number of scientists are against “assigning a price tag” to the wealth of nature, believing that the value of nature is infinite and cannot be expressed in monetary terms, and evaluating its individual elements is simply absurd. The magnitude of the natural resource potential, which is an element of social (national or regional) wealth, can be quantitatively represented only through cost indicators in the so-called national cadastral or world prices. the city's land cover, the territory of which is characterized by quite diverse soil and geochemical conditions.

The purpose of the work is to monetize individual ecosystem services (useful properties) of natural systems of the northwestern shelf of the Black Sea.

The work is based on the analysis of published data of domestic and foreign scientists, as well as on the materials of their own research. The authors characterized individual ecosystem services (useful properties) of natural systems of the northwestern shelf of the Black Sea, and also made an attempt to economically evaluate them based on existing information on market prices.

Despite the oriented assessment of the value of some ecosystem services (useful properties) of natural systems of the northwestern shelf of the Black Sea, they show their significant importance for the development of the economy of the coastal regions of Ukraine. The cost assessment of some ecosystem services (useful properties) of natural systems in war conditions is associated with certain difficulties, but even based on minimal values, the problems of their restoration and the prospects for their assimilation can be a significant contribution to the economic potential of the state. The maximum value falls on hydrocarbon resources, in particular on natural gas reserves, but since only 4% of the forecast reserves of hydrocarbon resources have been explored, in the future the cost assessment of hydrocarbon resources may be significantly increased, and therefore the exploration and exploitation of hydrocarbon deposits in the post-war period is an important task of ensuring the energy security of the state. Providing an economic assessment of some ecosystem services (maintenance, regulation, cultural) is a difficult task, but they are also very important components of the natural resource potential of the northwestern shelf of the Black Sea.

Keywords: northwestern shelf of the Black Sea, natural systems, ecosystem services, beneficial properties, monetization.

Подання до редакції : 18. 02. 2026
Надходження остаточної версії : 22. 04. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026

УДК 502/504+502.3/.7

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО КЛАСИФІКАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ: ПРИНЦИПИ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДОУТВОРЕННЯ НА ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ МАТЕРІАЛІВ

В.С. Волошин, В.А. Бурко

ДВНЗ «Приазовський Державний Технічний Університет»
87555, Україна, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7
Адреса місця фактичного розташування:
49044, Україна, м. Дніпро, вул. Гоголя, 29
vsvlshn52@gmail.com, burko_v_a@pstu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9922-5618>
<https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>

У роботі запропоновано механізм управління промисловими відходами, що ґрунтується на ієрархічній системі науково обґрунтованих принципів. На відміну від емпіричних підходів до оброблення та переробки, запропонований механізм забезпечує можливість мінімізації відходів за їх властивостями та якісними характеристиками на кожному етапі виникнення-технологічному, експлуатаційному, а також упродовж усього життєвого циклу відходу.

Розроблено функціональну схему, що відображає структурну ієрархію принципів управління промисловими відходами у взаємозв'язку з фундаментальними природничо-науковими законами та закономірностями. Система включає п'ять ієрархічно упорядкованих принципів: збереження та перерозподілу енергії й речовини, термодинамічної ефективності та незворотності процесів переробки, безпеки та реакційної активності речовин відходів різних класів, потенційної ресурсної цінності відходу, системної інтеграції та кібернетичної керуваності процесами мінімізації відходоутворення.

Запропонована ієрархія відповідає сучасним міжнародним вимогам до систем управління промисловими відходами та забезпечує науково обґрунтовану основу для систематизації методів управління ними. Підхід дозволяє враховувати як фундаментальні закони природознавства, так і можливості сучасної техносфери, інтегрованої з кібернетичними системами управління.

Практичне застосування запропонованої моделі продемонстровано на прикладі управління переробкою літій-іонних батарей, де залежно від глибини впливу розглядаються рішення від механічного поділу та термолізу до електрохімічного іонного обміну та вторинного використання компонентів.

Ключові слова: класифікація відходів, управління промисловими відходами, принципи мінімізації відходоутворення, термодинамічний підхід, кібернетичне управління, життєвий цикл матеріалів.

1. ВСТУП

Сучасні наукові доробки в галузі промислових відходів розглядають їх не лише як небезпечні і шкідливі речовини, але й як джерело певних матеріальних ресурсів, що відкриває нові можливості в управлінні відходами. Існуючі класифікації мають бути переглянуті з урахуванням їх ресурсної та економічної цінності як механізму управління відходами.

Проблеми управління промисловими відходами, більша частина яких є одним з головних забруднювачів довкілля, набуває дедалі більшої актуальності, посідаючи провідне місце серед глобальних проблем людства.

Підсумки Базельської конвенції 2024 та Всесвітній форум циклічної економіки у

Брюсселі відкрили нові напрями в переробці принципово нових сучасних промислових відходів, сприяли впровадженню циклічних моделей економіки і пошуку нових методів управління відходами, що є темою цих досліджень.

Історія системних класифікацій промислових відходів, та відповідна термінологія були сформовані наприкінці минулого сторіччя, коли були прийняті найважливіші документи щодо впорядкування впливу цих відходів на природне середовище, і які отримували продовження у наступні роки [1, 2, 3, 4]. За цей час суспільство прийшло до парадигми управління такими техногенними забрудненнями, включаючи не тільки їх шкідливість, але й ресурсний потенціал, як

сировинне джерело в промисловості. На сьогодні систематизація та класифікація промислових відходів лежить в основі науково обґрунтованих методів управління відходами [4, 5], у тому числі у контексті термодинамічних законів [6]. Їх ефективність залежить від того, які принципи та закономірності покладено в основу такої класифікації і такого управління.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Управління промисловими відходами має ретельніше використовувати можливості системного підходу через механізми класифікації таких відходів, для чого проблема потребує нових поглядів на особливий зміст самого поняття «промисловий відхід» та його місце серед матеріальних ресурсів людства.

Поставити відомі класифікації промислових відходів у відповідність до існуючих нових наукових досліджень щодо їх сутності, до сучасних уявлень про властивості та якості нових відходів, у тому числі – з позицій їх керованості.

Метою дослідження є розробка науково обґрунтованої ієрархічної системи принципів класифікації промислових відходів, яка забезпечує системний підхід до управління ними на всіх етапах життєвого циклу матеріалів, від фізико-хімічних характеристик до кібернетичної керованості процесами мінімізації відходоутворення.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Теоретичну основу дослідження становлять фундаментальні закони природознавства, закон збереження енергії та речовини, принципи термодинаміки та ентропійного аналізу, критерії хімічної безпеки речовин, а також концепції циклічної економіки. У роботі використано методи системного аналізу та структурно-функціонального моделювання для побудови ієрархічної системи принципів класифікації промислових відходів. Інформаційну базу дослідження склали міжнародні нормативні документи (Базельська конвенція, директиви ЄС щодо управління відходами), матеріали Всесвітнього форуму циклічної економіки - 2024 у Брюсселі, а також наукові публікації у галузі термодинаміки переробки відходів, гідрометалургії та кібернетичного управління промисловими процесами.

Для верифікації запропонованої ієрархічної моделі застосовано метод квазіалгоритмічного аналізу, що передбачає послідовну оцінку відходу за кожним із п'яти рівнів системи-від фізико-хімічних характеристик до можливостей

цифрового керування. Як об'єкт практичної апробації обрано відходи літій-іонних акумуляторних батарей як приклад складного багатокомпонентного промислового відходу з високою ресурсною цінністю та значним екологічним ризиком. Оцінювання проводилось за критеріями енергоємності процесів переробки, ексергетичного виходу, токсичності та реакційної активності компонентів, ресурсної цінності вилучених елементів.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Сучасні вимоги до систем управління промисловими відходами включають не тільки забезпечення емпіричної оброблення або переробки відходів за їх властивостями та якостями, але і їх мінімізацію на кожному етапі виникнення (технологічний, експлуатаційний та після експлуатаційний етапи життя матеріалів) і життєвого циклу самого відходу. На рис. 1 запропоновано функціональну схему, що відображає основні принципи такої поведінки з промисловими відходами в їх структурній ієрархії та в залежності від основних природно-наукових законів та закономірностей, що лежать в основі походження та подальшого існування відходу.



Рис. 1 – Функціональна схема управління промисловими відходами (ієрархія принципів R1–R5)

Fig. 1 – Functional diagram of industrial waste management (hierarchy of principles R1–R5)

Оброблення та переробка промислових відходів є складним і багатофункціональним завданням, вирішення якого можливе лише за наявності системного та науково обґрунтованого підходу. У роботі систематизовано та розглянуто

п'ять, на наш погляд, основоположних та ієрархічно пов'язаних принципів, які можуть бути основою сучасної систематизації та класифікації підходів до управління відходами залежно від їх властивостей та якостей.

Принцип R1. Принцип збереження та перерозподілу енергії та речовини при управлінні відходами (базовий, фізико-хімічний рівень).

На базовому рівні систематизація відходів починається із закону збереження енергії та речовини. Будь-які методи переробки відходів передбачають трансформацію їх складу чи форми. Залежно від агрегатного стану (тверді, рідкі, газоподібні), щільності, ентальпії та інших характеристик вибираються термічні, фізико-хімічні, механічні або інші методи впливу на конкретні види відходів. Прикладом може служити технологія піролізу пластичних мас, особливо поліетилену і поліпропілену, яка застосовується для отримання рідких палив і газів. Процес переробки вимагає точного енергетичного розрахунку та є ілюстрацією перерозподілу енергії та маси [7]. Іншим прикладом є обробка відпрацьованих кислот з відновленням сірчаної кислоти через фазові переходи, або електрична сепарація дрібнодисперсних металевих відходів (на основі мас-перенесення заряджених частинок) [8].

Принцип R2. Принцип термодинамічної ефективності та незворотності у процесах переробки відходів (ентропійний підхід).

Наступним рівнем класифікації є оцінка термодинамічної ефективності та ступеня незворотності процесів. У контексті цієї роботи під ентропією розуміється міра неупорядкованості системи: термодинамічна ентропія S_e відображає розсіювання енергії у фізико-хімічних процесах переробки відходів, тоді як інформаційна ентропія S_i характеризує складність і невизначеність у системах кібернетичного управління. Цей принцип дозволяє виділяти процеси з високим ступенем втрат (низький ексергетичний ККД) і визначати умови, за яких переробка відходів призводить до найбільшої потенційної користі. Це особливо важливо при переробці високоентропійних сумішей, наприклад флотаційних шламів або багатокомпонентних органічних розчинів. Як приклади, слід відзначити технологію спалювання відходів в апаратах з киплячим шаром, коли висока температура досягається за умови мінімальної ентропійної дисипації і високої ексергетичної ефективності [9]. Аналогічним прикладом є технологія газифікації

відходів та виробництво RDF (Refuse Derived Fuel -паливо з відходів) з рекуперацією тепла, або замкнуті цикли переробки розчинників із використанням рекуперативних конденсаторів [10].

Принцип R3. Принцип небезпеки та реакційної активності речовин для відходів різних класів небезпеки (еколого-хімічний рівень).

Наступним рівнем класифікації має бути ступінь небезпеки відходів, заснований на їхній реакційній здатності, токсичності, біоаккумулятивності та стійкості. Класифікація відходів на основі таких класів небезпеки (за GHS, REACH та іншими міжнародними системами) визначає необхідність у специфічних технологіях: нейтралізації, інкапсуляції, стабілізації або спалюванні при високій температурі. Наприклад, ціанідовмісні шлами вимагають окислювальної детоксикації. Це про ціанідні відходи золотовидобування, які проходять етап окислювальної детоксикації з використанням хлорного натрію або перекису водню. У технологіях нейтралізації кислотних шламів застосовують вапняні та магнієві суспензії. [10]. Ще одним прикладом можна вважати переробку ПХБ (поліхлорбіфенілів) методом гідрогенолізу або про неущкодження фтористих відходів в алюмінієвій промисловості з використанням вапна [12].

Принцип R4. Принцип потенційної ресурсної цінності відходу (ресурсний рівень).

Цей принцип дозволяє виділяти таку якість відходів, як потенційні вторинні ресурси, ще раз підтверджуючи принцип збереження та перерозподілу енергії та речовини. Тут оцінюється вміст цінних компонентів (металів, вуглеців, рідкісноземельних елементів), можливості їх регенерації, повторного використання та включення в наступні цикли виробництва. Відповідно до принципів циклічної економіки та cradle-to-cradle підходу, відходи розглядаються як носії корисної ресурсної функції. Наприклад, різні шлами алюмінієвого виробництва переробляються з вилученням скандію, титану та рідкісноземельних елементів з використанням гідрометалургії та кислотного вилуговування [13]. Іншими прикладами можуть бути технології вилучення паладію та платини з каталізаторів нафтопереробки, або й вилучення міді та срібла з електронних плат шляхом кислотного вилуговування [14].

Принцип R5. Принцип системної інтеграції та кібернетичної керованості (системний рівень) процесами мінімізації відходоутворення.

Найвищим рівнем систематизації в управлінні промисловими відходами є інтеграція методів у рамках кібернетичних та цифрових систем керування відходами. Тут використовуються принципи системного аналізу, еколого-інформаційного моделювання та концепції «індустріального симбіозу». Сюди ж входять методи та автоматизовані системи прийняття рішень на основі ЛПР, ШІ та технологій моніторингу потоків речовини та енергії в реальному часі. Такий підхід забезпечує динамічну адаптацію відомих методів переробки відходів щодо змін їх складу у існуючих умовах виробництва. Найвищим рівнем систематизації є включення процесів у цифрові та кібернетичні моделі управління, включаючи цифрові двійники, автоматичне управління та зворотний зв'язок за даними моніторингу.

Прикладом може бути інтеграція SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition) та ШІ в управлінні термічними установками для переробки небезпечних відходів, яка дозволяє оптимізувати завантаження, знизити викиди, підвищити енергетичну віддачу [12]. Або технологія застосування цифрового двійника сміттєспалювального заводу для оптимізації режимів горіння, або і використання IoT-датчиків для оптимізації компостування органічних відходів [10].

Актуальним напрямом реалізації принципу R5 є методологія мінімізації промислових відходів безпосередньо у джерелі їх утворення — технологічному процесі [14, 15]. Замість витратних процесів оброблення та переробки відходів після їх виникнення, сучасна інженерна екологія наголошує на запобіганні їх появи шляхом оптимізації та реінжинірингу виробничого процесу, використовуючи для цього запропонований механізм термодинамічної двоєдності як першопричини утворення промислових відходів [15]. Мінімізація відходів у джерелі є стратегічно вигіднішим шляхом, який узгоджується з п'ятьма універсальними науковими принципами: зниження енергетичних та ресурсних витрат, зменшення ентропійних втрат, зниження хімічних та інших ризиків, збільшення економічної ефективності та спрощення управління виробничими процесами. Така стратегія дозволяє розбудовувати промисловість за принципами сталого розвитку та «синьої економіки» (Blue Economy) - концепції замкнених виробничих циклів, де відходи одного процесу стають ресурсом для іншого [16].

Повернемося до структури викладених вище "принципів". Функціональні та ієрархічні

структурні взаємозв'язки між аналізованими принципами управління промисловими відходами (див. рис. 1) відображають послідовність від принципу R1. вихідного для всіх зв'язків, до принципу R5., як мінімум, точки збору всієї керуючої інформації і, як максимум, автоматизованого управління всією системою управління промисловими відходами. Послідовність і наступність кожного з аналізованих принципів відображено в змінах ентропії для системи перетворення відходів. Графік зростання ентропії за рівнями принципів (рис. 2) підкреслює перехід від низькоентропійних фізичних закономірностей (R1) до високоентропійних складних систем (R5), що містять саме інформаційну ентропійну складову як домінуючий керуючий вплив на всю систему.

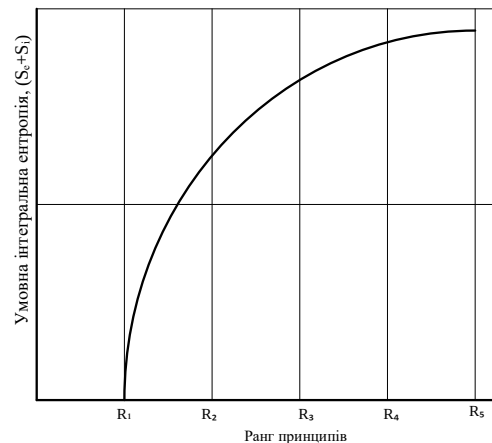


Рис. 2 – Оціночний графік інтегральної ентропійної прогресії за функціональними рівнями: Se-термодинамічна (фізична) ентропія, Si-інформаційна ентропія як міра складності системи управління; сумарна ентропія Se+Si зростає від базового рівня R1 до системного рівня R5.

Fig. 2 – Evaluation graph of integral entropy progression by functional levels: Se-thermodynamic (physical) entropy, Si- information entropy as a measure of control system complexity; total entropy Se+Si increases from base level R1 to system level R5.

Певну інформацію про ефективність аналізованої системи цінностей при управлінні відходами дає матриця суміжності для логічних залежностей між принципами систематизації в управлінні відходами (рис. 3). Матриця дозволяє оцінити, як кожен принцип (рядок) впливає на інші принципи (стовпці). Вплив виражається логічними значеннями: сірий колір відповідає суттєвій залежності між елементом рядка та елементом стовпця, білий-відсутності такої

залежності. Слід зазначити, що матриця є несиметричною, оскільки характеристики кореляційності (ступінь взаємопов'язаності принципів) відображено над головною діагоналлю, а показники інцидентності (факт безпосереднього зв'язку)-під нею. Така матриця може лежати в основі формалізації впливу одного принципу на інший і, таким чином, допомагає будувати автоматизовані логічні рішення в галузі управління відходами.

Ієрархічна (рис. 1) та матрична (рис. 3) інтерпретації виявляють дві ключові характеристики запропонованих принципів: ступінь їх взаємозв'язку та факт безпосередньої взаємодії між ними. Розглянемо їх із позицій узгодженості. Відповідні характеристики запропонованих принципів у взаємодії та інцидентії наведені в таблиці 2. Суттєвою особливістю їх є взаємний ієрархічний зв'язок, з чого випливає велика низка методів управління такими відходами, використовуючи для цього саме їх внутрішні класифікаційні співвідношення між принципами.

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
R ₁	1	R ₁ +R ₂	R ₁ +R ₃	R ₁ +R ₄	R ₁ \R ₅
R ₂	R ₂ \R ₁	1	R ₂ +R ₃	R ₂ +R ₄	R ₂ \R ₅
R ₃	R ₃ \R ₁	R ₃ \R ₂	1	R ₃ \R ₄	R ₃ +R ₅
R ₄	R ₄ \R ₁	R ₄ \R ₂	R ₄ \R ₃	1	R ₄ +R ₅
R ₅	R ₅ \R ₁	R ₅ \R ₂	R ₅ \R ₃	R ₅ \R ₄	1

Рис. 3 – Матриця суміжності логічних залежностей між функціональними рівнями у послідовності «принципів R_i»
Fig. 3 – Adjacency matrix of logical dependencies between functional levels in the sequence of "R-principles"

Принцип збереження енергії та речовини (R₁)-це базовий рівень ієрархії. Його роль є фундаментальною (генератор зв'язків). Принцип R₁ не надає прямого впливу на R₅, але опосередковано впливає через R₂ та R₄. Принцип термодинамічної ефективності R₂ виконує в системі роль енергетичного регулятора. Визначальним для нього є показник зростання інтегральної ентропії (термодинамічної S_e та насамперед інформаційної S_i) в міру просування рівнями (див. рис. 2). Принцип безпеки та

реакційної активності R₃) виступає як «фільтр» безпеки та екологічної прийнятності для керованого промислового відходу. Цей принцип ґрунтується на R₁ і R₂ (умови зберігання, переробки, екзотермічні реакції тощо). Принцип ресурсної цінності (R₄) є основним для реалізації найсучаснішого принципу R₅: цінні компоненти відходів вимагають точного моніторингу та автоматизованого вилучення. І наостанок, принцип кібернетичної керованості (R₅)-це найвищий рівень, що дозволяє отримувати дані від усіх нижченаведених принципів, як системний інтегратор у фінальній точці управління з відходом. Цей принцип не впливає на інші принципи безпосередньо, але модифікує реалізацію всіх процесів через управління, зворотний зв'язок, оптимізацію.

Така класифікація основних принципів може бути готовим інструментом для управління промисловими відходами, наприклад, у вигляді алгоритму послідовності функцій та керуючих процесів.

Як приклад управління промисловими відходами, на підставі запропонованої моделі «принципів», розглянемо процедури мінімізації відходів, що розглядаються у вигляді відпрацьованих акумуляторних (літій-іонних) батарей. З метою визначення оптимального способу переробки/утилізації цих відходів на основі властивостей за п'ятьма розглянутими принципами, складемо автоматизовану логічну модель (у вигляді квазіалгоритму класифікації відходів).

Слід розуміти, що у фізично обґрунтованих «принципах» за основу приймається послідовно склад, ставлення до енергії, що сприймається, небезпека для біологічних систем, раціональність і, нарешті, керованість. У такій же послідовності розташовуються методи переробки літій-іонних батарей – від механічного низькотемпературного поділу до високотемпературних та хімічних впливів та двійникових ефектів, залежно від стану та готовності сировини, що переробляється (табл. 1).

Застосування запропонованої ієрархії до відходів літій-іонних акумуляторних батарей демонструє практичну ефективність моделі. За принципом R₁ батареї характеризуються високою щільністю енергії та складним хімічним складом (літій, кобальт, графіт, органічні електроліти), що визначає механічний поділ, термоліз і пірометалургію як базові методи переробки. Принцип R₂ вказує на значну енергоємність термічних процесів, яка оптимізується за рахунок рекуперації тепла у

Таблиця 1 – Оцінка результатів послідовного керування відходами акумуляторних (літій-іонних) батарей відповідно до запропонованої систематизації.

Table 1 – Evaluation of sequential waste management results for battery (lithium-ion) cells according to the proposed systematization of principles R1–R5 (each row presents: assessment criterion per principle, battery characteristics, and recommended processing technology)

Принцип	Характеристика батарей	Технологія переробки
R1	Висока щільність енергії; літій, кобальт, графіт, органічні електроліти	Механічний поділ, термоліз, пірометалургія
R2	Термічне відновлення вимагає значних енерговитрат; оптимізується рекуперацією	Переробка у високотемпературних печах з рекуперацією тепла
R3	Летючі електроліти вибухонебезпечні; можливий термічний розгін	Попередній розряд, пасивація електроліту
R4	Висока цінність літію, кобальту, нікелю	Гідрометалургія, селективне осадження, іонообмін
R5	Весь цикл інтегрується в автоматизовані лінії	SCADA-системи, цифрові двійники заводів

високотемпературних печах. Принцип R3 фіксує підвищену небезпеку: летючі електроліти є вибухонебезпечними у зруйнованому стані і здатні до термічного розгону, що вимагає попереднього розряду та пасивації. Принцип R4 виявляє високу ресурсну цінність-літій, кобальт і нікель вилучаються методами гідрометалургії, селективного осадження та іонного обміну з суттєвим економічним ефектом. Нарешті, принцип R5 забезпечує інтеграцію всього циклу переробки в автоматизовані сортувальні лінії з використанням SCADA-систем і цифрових двійників переробних заводів.

В технологіях переробки літій-іонних батарей (таблиця 1) енергоефективність може досягатися за рахунок реакцій нейтралізації з мінімальними витратами. Хімічна реактивність визначає вибір реагентів. Екологічна безпека виключає скидання продуктів у довкілля. Економічна доцільність залежить від вартості реагентів та обладнання. Послідовний аналіз можливостей кожного з аналізованих принципів дозволяє формувати ті чи інші ефективніші та раціональніші схеми

переробки даного відходів, залежно від глибини цього аналізу та існуючих технічних можливостей. Можливості такої системи управління не обмежуються отриманими результатами і можуть бути глибшими, залежно від граничних умов реалізації.

4. ВИСНОВКИ

Запропонована ієрархія з п'яти принципів класифікації відходів-від фізичних законів до цифрового управління-забезпечує основу науково обґрунтованої систематизації методів управління відходами. В їх основі-системний підхід до класифікації методів управління промисловими відходами. Така ієрархічна побудова дозволяє враховувати як фундаментальні закони природознавства та фундаментальні властивості речовин, так і можливості сучасної техносфери, інтегрованої з кібернетичними системами управління. Запропонований підхід сприяє створенню стійкої системи управління промисловими відходами розробки ефективних рішень, що мінімізують вплив промисловості на довкілля.

Послідовність заявлених «принципів» управління відходами дозволяє здійснювати пошук найбільш оптимальних з погляду функції «небезпека/користь», способів переробки та мінімізації отриманих промислових відходів. Запропонований для цього квазіалгоритм, у першому наближенні, дає можливість на кожному етапі управління бачити максимальну вигоду від тих чи інших відомих способів мінімізації відходу, і, як результат, пропонувати оптимальні з них.

Як ілюстрація такої ієрархії, в моделі управління переробкою літій-іонних батарей, в залежності від глибини впливу, пропонуються технічні рішення від способів механічного поділу і термолізу, пасивації небезпечного відходу і селективного осадження, до електрохімічних способів іонного обміну і вторинного використання елементів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Базельська конвенція про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням : прийнята 22 берез. 1989 р. Базель : UNEP, 1989. URL: <https://www.basel.int> (дата звернення: 16.10.2025).
2. United States Environmental Protection Agency (EPA). Defining Hazardous Waste: Listed, Characteristic and Mixed Radiological Wastes : EPA Publication EPA/530-F-02-013. Washington, DC : U.S. EPA, 2024. 15 p.
3. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). OECD Legal Instruments — Definitions and Clarifications on Wastes. OECD Legal Database. Paris :

- OECD, 2024. URL: <https://legalinstruments.oecd.org> (дата звернення: 16.10.2025).
4. Frosch R. A., Gallopoulos N. E. Strategies for Manufacturing. Scientific American. 1989. Vol. 261, No. 3. P. 144–152.
 5. Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy. Volumes 1–3. Isle of Wight ; London, 2012–2014.
 6. Baumgärtner S. Necessity and Inefficiency in the Generation of Waste: A Thermodynamic Analysis. International Journal. 2003. P. 113–123.
 7. Cheremisinoff N. P. Industrial Waste Treatment Handbook. Butterworth-Heinemann, 2003. P. 145–163.
 8. Tchobanoglous G., Kreith F. Handbook of Solid Waste Management. McGraw-Hill, 2002.
 9. Müller W. Thermodynamics and Industrial Waste Treatment. Elsevier, 2014. P. 212–229.
 10. Allen D. T., Shonnard D. R. Green Engineering. Upper Saddle River : Prentice Hall. Pearson Education, 2001. 576 p.
 11. Tchobanoglous G., Kreith F. Handbook of Solid Waste Management. 2nd ed. New York : McGraw Hill Handbooks, 2002. 273 p.
 12. Friedrich B., Petersen J. Waste Management and Resource Efficiency. Springer, 2005. P. 391–412.
 13. Cheremisinoff N. P. Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimisation Technology. New York : Elsevier Science, 2003. 477 p.
 14. Волошин В. С., Бурко В. А. Мінімізація промислових відходів у технологічних процесах, термодинамічний підхід. Екологічні науки. 2024. № 6 (57). С. 25–30.
 15. Волошин В. С., Бурко В. А. Відповідність принципу термодинамічної двоєдності, як причини відходоутворення. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2024. Вип. 49, т. 2. С. 86–93.
 16. Pauli G.A. The Blue Economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs. Taos, New Mexico: Paradigm Publications, 2010. 336 p. ISBN 978-0-912111-90-2.
 3. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). OECD Legal Instruments — Definitions and Clarifications on Wastes. OECD Legal Database. Paris : OECD, 2024. URL: <https://legalinstruments.oecd.org> (Accessed: 16.10.2025).
 4. Frosch R. A., Gallopoulos N. E. Strategies for Manufacturing. Scientific American. 1989. Vol. 261, No. 3. P. 144–152.
 5. Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy. Volumes 1–3. Isle of Wight ; London, 2012–2014.
 6. Baumgärtner S. Necessity and Inefficiency in the Generation of Waste: A Thermodynamic Analysis. International Journal. 2003. P. 113–123.
 7. Cheremisinoff N. P. Industrial Waste Treatment Handbook. Butterworth-Heinemann, 2003. P. 145–163.
 8. Tchobanoglous G., Kreith F. Handbook of Solid Waste Management. McGraw-Hill, 2002.
 9. Müller W. Thermodynamics and Industrial Waste Treatment. Elsevier, 2014. P. 212–229.
 10. Allen D. T., Shonnard D. R. Green Engineering. Upper Saddle River : Prentice Hall. Pearson Education, 2001. 576 p.
 11. Tchobanoglous G., Kreith F. Handbook of Solid Waste Management. 2nd ed. New York : McGraw Hill Handbooks, 2002. 273 p.
 12. Friedrich B., Petersen J. Waste Management and Resource Efficiency. Springer, 2005. P. 391–412.
 13. Cheremisinoff N. P. Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimisation Technology. New York : Elsevier Science, 2003. 477 p.
 14. Voloshyn V. S., Burko V. A. Minimization of industrial waste in technological processes: a thermodynamic approach. Ekologichni nauky [Ecological Sciences]. 2024. No. 6 (57). P. 25–30.
 15. Voloshyn V. S., Burko V. A. Compliance with the principle of thermodynamic duality as a cause of waste generation. Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences. 2024. Issue 49, Vol. 2. P. 86–93.
 16. Pauli G.A. (2010). *The Blue Economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs*. Taos, New Mexico: Paradigm Publications. 336 p. ISBN 978-0-912111-90-2.
- ## REFERENCES
1. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal : adopted 22 March 1989. Basel : UNEP, 1989. URL: <https://www.basel.int> (Accessed: 16.10.2025).
 2. United States Environmental Protection Agency (EPA). Defining Hazardous Waste: Listed, Characteristic and Mixed

SYSTEMIC APPROACH TO THE CLASSIFICATION OF INDUSTRIAL WASTE: PRINCIPLES OF WASTE MINIMIZATION AT THE STAGES OF THE MATERIAL LIFE CYCLE

V. S. Voloshyn, V. A. Burko

7 Universytetska St, Mariupol, 87555, Ukraine
Actual business address: 29 Hoholia St, Dnipro, 49044, Ukraine
vsvlshn52@gmail.com, burko_v_a@pstu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9922-5618>
<https://orcid.org/0000-0002-7384-4226>

The paper proposes an industrial waste management mechanism based on a hierarchical system of scientifically grounded principles. Unlike empirical approaches to waste treatment and processing, the proposed mechanism ensures waste minimization according to the properties and qualitative characteristics of waste at each stage of its generation - technological and operational - as well as throughout the entire life cycle of the waste itself.

A functional scheme has been developed reflecting the structural hierarchy of industrial waste management principles in relation to fundamental natural science laws and patterns. The system comprises five hierarchically ordered principles: conservation and redistribution of energy and matter; thermodynamic efficiency and irreversibility of processing; hazard and reaction activity of substances in waste of various hazard classes; potential resource value of waste; and system integration and cybernetic controllability of waste minimization processes.

The proposed hierarchy complies with current international requirements for industrial waste management systems and provides a scientifically grounded basis for the systematization of waste management methods. The approach enables consideration of both the fundamental laws of natural science and the capabilities of the modern technosphere integrated with cybernetic control systems.

The practical application of the proposed model is demonstrated using lithium-ion battery waste management as a case study, where solutions ranging from mechanical separation and thermolysis to electrochemical ion exchange and secondary use of components are considered depending on the depth of intervention.

Keywords: waste classification, industrial waste management, waste minimization principles, thermodynamic approach, cybernetic control, material life cycle.

*Подання до редакції : 21. 01. 2026
Надходження остаточної версії : 25. 03. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026*

УДК 054.5:613.31

ІННОВАЦІЙНА ХАРЧОВА БІОТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО НАПОЮ З БАКТЕРИЦИДНИМ ЕФЕКТОМ ЗА УМОВ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСУ МІНЕРАЛЬНИХ ВОД

¹А. В. Пасенко, ²І. О. Солошич

¹Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, 39600, Кременчук, Україна

pasenkoalena2015@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1108-0408>

²Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, 39600, Кременчук, Україна

soloishych@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-8842-5120>

Розробка інноваційних рішень щодо підвищення якості харчової продукції на основі підземних мінеральних вод за умов раціонального їх використання сприятиме наближенню країни до європейських вимог законодавства щодо користування водними ресурсами, їх екологічно спрямоване відновлення та захист. Одним із напрямів щодо забезпечення ресурсозбереження мінеральних вод та джерел прісної питної води є максимальне використання їх цінних харчових складових, особливо в умовах урбанізованих густо заселених територій. Використання імуномодельючих добавок в мінеральних водах не тільки покращить показники якості напоїв, а й сприятиме оптимізації використання ресурсу підземних вод. Надання питному продукту імуномодельючих властивостей з бактерицидним ефектом забезпечуватиме організм споживача комплексом вітамінів, біологічно активних речовин за менш короткий термін, ніж звичайна мінеральна вода. Метою роботи є аналіз інноваційної харчової біотехнології отримання функціонального напою з бактерицидним ефектом за умов оптимізації використання ресурсу мінеральних вод. Об'єктом дослідження у роботі є біотехнологія отримання екологічно безпечного питного продукту з імуномодельючими властивостями. Предметом роботи є дослідження якості питного продукту на основі мінеральної води при додаванні імуномодельючого рослинного екстракту для підвищення імунного статусу населення в умовах воєнного стану. У роботі використані теоретичні методи (аналіз, синтез, узагальнення, порівняння та систематизація наукових джерел і нормативних документів), емпіричні методи (оцінка показників якості питної води; метод визначення санітарно-гігієнічного показника колі-індексу; метод визначення мікробного числа; біотестування), методи інтерпретації та узагальнення результатів, які дозволили оцінити основні показники якості функціонального імуномодельючого напою з бактерицидним ефектом. Наукова новизна роботи полягає у додаванні імуномодельючого рослинного екстракту на основі *Echinacea purpurea* та *Citrus limon* для надання функціональних властивостей питній, мінеральній воді торгової марки BUVETTE як важливого харчового продукту щоденного використання, що сприятиме підвищенню популяційного здоров'я та імунного статусу представників населення. Практичною цінністю роботи є отримання функціонального імуномодельючого напою з бактерицидним ефектом за умов оптимізації використання ресурсу мінеральних вод, що сприятиме збереженню природних вод. Визначено, що якість вихідної мінеральної води природного походження торгової марки BUVETTE ТОВ «Ізумруд-ЛТД» та функціональні напої з додаванням біоактивних рослинних екстрактів на основі *Echinacea purpurea* та *Citrus limon* відповідають нормативним вимогам за органолептичними показниками та результатами біотестування. Додавання до напоїв імуномодельючого рослинного екстракту покращує їх якість за санітарно-гігієнічними показниками, про що свідчить зниження мікробного числа питних напоїв більше ніж на 60 % порівняно з контролем, а показники колі-індексу досягають нульових значень. Це підтверджує бактерицидну дію напоїв завдяки додаванню біологічно активних речовин у складі рослинних екстрактів, що сприятиме підвищенню імунної відповіді та зниженню захворюваності у споживачів.

Ключові слова: інноваційна харчова біотехнологія, екологічні проблеми водних ресурсів, мінеральні води, якість питної води, функціональний напій, імуномодельючий екстракт, *Echinacea purpurea*, *Citrus limon*, бактерицидна дія, біотестування, санітарно-гігієнічні показники якості води, мікробне число, колі-індекс, *Escherichia coli*.

1. ВСТУП

Проблема дефіциту якісної питної води є однією з ключових для сучасної харчової промисловості, зокрема у виробництві безалкогольних напоїв. Вода виступає основним компонентом такої продукції, тому її фізико-хімічні та мікробіологічні показники безпосередньо впливають на безпечність, органолептичні властивості та стабільність готового продукту. В умовах зростаючого антропогенного навантаження на водні ресурси, погіршення якості природних джерел водопостачання та зношеності систем водопідготовки проблема забезпечення виробництва водою, що відповідає санітарно-гігієнічним вимогам, набуває особливої актуальності. Недостатня якість вихідної води потребує застосування багатоступеневих технологій очищення та доочищення, що, у свою чергу, призводить до зростання виробничих витрат і ускладнення технологічних процесів. Крім того, невідповідність води нормативним показникам може спричинити порушення рецептур, зниження якості напоїв і ризики для здоров'я споживачів. У зв'язку з цим актуальним є пошук ефективних, економічно доцільних і екологічно безпечних методів підготовки води, здатних забезпечити стабільну якість продукції в умовах обмежених водних ресурсів [1].

Збереження та раціональне використання запасів води, яка належить до найцінніших природних ресурсів, є однією з глобальних проблем ХХІ сторіччя [2, 3]. Вода необхідна для життя людини та інших організмів, оскільки бере участь у метаболічних процесах, притаманних живим системам. Крім того, вода забезпечує санітарно-гігієнічні потреби і найважливіші для людей функції: виробництво продовольства, енергії та промислової продукції.

Сучасний етап розвитку людства супроводжується зростанням антропогенного впливу на гідросферу. Збільшення населення Землі та зумовлене технічним прогресом підвищення інтенсивності водокористування разом із глобальними кліматичними змінами є чинниками, що створюють значний тиск на водні ресурси у планетарному масштабі [4, 5].

На забруднення як поверхневих, так і підземних вод впливає цілий перелік факторів. Головним джерелом дифузного забруднення підземних вод є сільське господарство та міське землекористування. Основною причиною погіршення якісного стану підземних вод від

дифузних джерел є забруднення їх аніонами нітратів та катіонами амонію.

Скринінг джерел антропогенного навантаження на стан підземних вод України вказує на суттєвий вплив точкових джерел забруднення. Серед основних забруднювачів варто виділити нафтохімічні, металургійні, машинобудівні, металургійні комплекси, а також вугільна промисловість, шламо- та хвостосховища, відстійники промстоків, полігони побутових відходів та відвалів порід. Забруднені стічні води, що надходять із вугільної, хімічної і нафтохімічної промисловості, чорної металургії, а також житлово-комунальних господарств за попередньою оцінкою, є основним джерелом регіонального забруднення не тільки поверхневих, а й підземних вод унаслідок фільтрації із річок. Окрім стічних вод, значний вплив на формування якості поверхневих і підземних вод здійснюють шахтні води, що за певних умов потрапляють у верхні водоносні горизонти [6].

Склад природних вод формується при контакті з геологічними породами, які містять традиційні макрокомпоненти – катіони натрію, калію, кальцію та магнію, а також мікрокомпоненти, серед яких внаслідок забруднення водних ресурсів можуть зустрічатися важкі метали та радіонукліди. Концентрація шкідливих речовин у водах залежить від умов формування їх складу при контакті з породами [7, 8]. Тому важливим питанням для розгляду є оптимізація складу мінеральних вод шляхом збагачення напою імуномодулюючими сполуками. Таке комплексне рішення допоможе досягти покращення якості вод шляхом додавання певних компонентів з важливою функціональною дією на організм людини.

Крім цього, раціональне використання водних ресурсів на сьогодні є важливим питанням в умовах екстенсивного водокористування, недотримання екологічних обмежень та нормування, що призводить до виникнення проблем з водозабезпеченням населення якісною водою підземних джерел у різних регіонах [9], тому питання щодо оптимізації використання вказаних ресурсів, у тому числі мінеральних вод, є важливим прикладним питанням фахівців харчової галузі, медицини, екології людини.

Розробка інноваційних рішень щодо підвищення якості харчової продукції на основі підземних мінеральних вод за умов

раціонального їх використання сприятиме наближенню країни до європейських вимог законодавства щодо користування водними ресурсами, їх екологічно спрямоване відновлення та захист [9]. Одним із напрямів щодо забезпечення ресурсозбереження мінеральних вод та джерел прісної питної води є максимальне використання їх цінних харчових складових, особливо в умовах урбанізованих густо заселених територій.

Використання імуномодельюючих добавок в мінеральних водах не тільки покращить показники якості напоїв, а й сприятиме оптимізації використання ресурсу підземних вод. Надання питному продукту імуномодельюючих властивостей з бактерицидним ефектом [2] забезпечуватиме організм споживача комплексом вітамінів, біологічно активних речовин за менш короткий термін, ніж звичайна мінеральна вода.

Метою статті є аналіз інноваційної харчової біотехнології отримання функціонального напою з бактерицидним ефектом за умов оптимізації використання ресурсу мінеральних вод.

Мета реалізована у таких завданнях:

- обґрунтування біотехнологічного рішення щодо отримання функціонального напою на основі мінеральної води з додаванням біологічно активних речовин рослинних екстрактів *Echinacea purpurea* та *Citrus limon*;

- аналіз якості природної мінеральної води зі свердловин із застосуванням методу біотестування;

- дослідження бактерицидних властивостей напоїв на основі мінеральної води при додаванні імуномодулюючих рослинних екстрактів за санітарно-гігієнічними показниками.

Об'єктом дослідження у роботі є біотехнологія отримання екологічно безпечного питного продукту з імуномодельюючими властивостями.

Предметом роботи є дослідження якості питного продукту на основі мінеральної води при додаванні імуномодулюючого рослинного екстракту для підвищення імунного статусу населення в умовах воєнного стану.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі для досліджень використана мінеральна столова вода BUVETTE зі свердловини № 5 (44 м, с. Майбородівка, Полтавської області) – гідрокарбонатна,

сульфатно-гідрокарбонатна, різного катіонного складу, має природний стан, негазована, призначена для щоденного вживання, як освіжаючий напій та для приготування їжі, тому підходить для даного дослідження.

У процесі дослідження було використано комплекс методів. Зокрема, теоретичні методи (аналіз, синтез, узагальнення, порівняння та систематизація наукових джерел і нормативних документів), емпіричні методи (оцінка показників якості питної води; метод визначення санітарно-гігієнічного показника колі-індексу; метод визначення мікробного числа; біотестування), методи інтерпретації та узагальнення результатів, які дозволили оцінити основні показники якості функціонального імуномодельюючого напою з бактерицидним ефектом.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для збагачення мінеральної води на біологічно активні речовини з отриманням функціонального напою у роботі запропоновано використання рослинних екстрактів на основі *Echinacea purpurea* та *Citrus limon* зумовлено їх вітамінною та мінеральною цінністю. *Citrus limon* містить велику кількість біологічно активних компонентів, серед яких істотну роль відіграє вітамін С. У свою чергу, хімічний склад *Echinacea purpurea* дуже багатий на вітаміни А, С, Е, калій, магній, марганець і натрій. Рослинна сировина містить велику кількість кальцію, заліза, кремнію, що допомагає генерувати здорові тканини після операцій, селен для опірності організму різним захворюванням. Всі ці речовини забезпечують позитивний вплив ехінацеї та лимону на імунну систему споживача, на регуляцію обміну речовин і мають високу противірусну, протизапальну, протигрибкову, сечогінну та бактерицидну дії. Аргументація щодо використання комплексу екстрактів наведених рослин ґрунтується на їх здатності позитивно впливати на імунний статус організму людини.

Цінним запропонованим у роботі прикладним рішенням з харчової біотехнології є рекомендація щодо надання імуномодельюючих властивостей напоєм з мінеральних вод шляхом додавання рослинного екстракту на основі *Echinacea purpurea* та *Citrus limon*, що підвищить опірність організму представників населення, їх адаптаційних можливостей в умовах дії несприятливих екологічних чинників.

Крім цього, такий імуномодельючий напій допоможе покращити проблему раціонального використання водних ресурсів та мінімізувати негативний вплив екологічних проблем на склад природних мінеральних вод.

На початку досліджень було проведено біотестування води «Ізмурдна» негазована. Застосовували стандартну уніфіковану методику біотестування з визначення гострої токсичної дії води. В якості тест-об'єктів було використано представників гіллястовусих рачків виду *Daphnia magna*. Рівень токсичності визначався на основі відсотка загиблених тест-об'єктів (дафній) у тестованій воді в порівнянні з контролем. В якості контролю було використано водопровідну воду, що піддавалася дехлоруванню шляхом відстоювання протягом двох діб. Результат досліджень показав, що гостра токсична дія не проявляється. За класифікаційною шкалою досліджувані проби води відносяться до 1 класу токсичності і є нетоксичними (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати біотестування води ТОВ «Ізмурд-ЛТД»

Table 1 – Results of water biotesting by Izumrud-LTD LLC

Показник Проба	Загибель тест-об'єктів,% / токсична дія 2024 рік	Загибель тест-об'єктів,% / токсична дія 2025 рік
Бутильована	0 / відсутня	0 / відсутня
Підземна №1	0 / відсутня	0 / відсутня
Підземна №2	0 / відсутня	0 / відсутня
Поверхнева №1	16 / відсутня	10 / відсутня
Поверхнева №2	10 / відсутня	6,6 / відсутня
Грунт №1	3,3 / відсутня	0 / відсутня
Грунт №2	0 / відсутня	0 / відсутня

Для отримання функціонального напою на основі мінеральної води у роботі було виконано приготування водних екстрактів лимону *Citrus limon* та ехінацеї пурпурової *Echinacea purpurea*. Для приготування екстракту а основі лимону *Citrus limon* використали четверту частину лимону, з якого було вичавлено сік в колбу. Після цього вміст колби було залито кип'ятком для запарювання. Колбу було закрито і залишено на певний час для настоювання. Для приготування екстракту з ехінацеї було використано суху масу рослин у вигляді фітомаси із зеленої частини та маси квіток. На 0,5 дм³ кип'яченої води було використано 1 ст. ложку фітомаси ехінацеї. Після цього колбу з біоагентами було закрито і залишено на певний час для настоювання. Масу рослинної сировини

для приготування екстракту з ехінацеї визначали ваговим методом.

Після отримання водних екстрактів була використана мінеральна вода «Ізмурдна». Для приготування напою з *Echinacea purpurea* було використано співвідношення екстракту до води 1:3. Було приготовано два типи напою з квітками та зеленою фітомасою ехінацеї. Для приготування напою з *Citrus limon* було використано співвідношення водного розчину лимонного соку до води як 1:2. Також виготовлено напій з використанням обох екстрактів у співвідношенні 300 мл води : 50 мл екстракту ехінацеї : 100 мл екстракту лимону. Етапи процесу приготування водних рослинних екстрактів наведено на рис. 1.



Рис. 1 – Приготування рослинних екстрактів:

- 1) фітомаса ехінацеї пурпурової *Echinacea purpurea*;
- 2) зважування біомаси *Echinacea purpurea*;
- 3) водний екстракт зеленої маси *Echinacea purpurea*;
- 4) водний екстракт квіток *Echinacea purpurea*;
- 5) водний екстракт *Citrus limon*

Fig. 1 – Preparation of plant extracts:

- 1) phytomass of *Echinacea purpurea*;
- 2) weighing of *Echinacea purpurea* biomass;
- 3) aqueous extract of green mass of *Echinacea purpurea*;
- 4) aqueous extract of *Echinacea purpurea* flowers;
- 5) aqueous extract of *Citrus limon*

У роботі проведено визначення показників якості напоїв, що приготували на основі мінеральної води з рослинними екстрактами. Органолептичні показники оцінювали відповідно до ДСанПіН 2.2.4-171-10 [10]. Оцінка проводилась за такими показниками: колір,

аромат, смак і присмак, прозорість.

Усі показники дослідних проб мали значення, що відповідають нормативним вимогам. Тобто, дана вода може бути запропонована до

вживання. Результати оцінювання даного критерію наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Органолептичні показники якості питної води

Table 2 – Organoleptic indicators of drinking water quality

Проба		Назва показника	Значення показника
1 (квітки ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	1	Колір	Світло-коричневий
	2	Аромат	Властивий травам
	3	Смак і присмак	Кисло-солодкий
	4	Прозорість	Без зависів
2 (лимон <i>Citrus limon</i>)	1	Колір	Світло-жовтий
	2	Аромат	Слабко виражений
	3	Смак і присмак	Властивий відповідним фруктам
	4	Прозорість	Без зависів
3 (лимон + квітки ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	1	Колір	Світло-коричневий
	2	Аромат	Властивий травам
	3	Смак і присмак	Кисло-солодкий
	4	Прозорість	Без зависів
4 (зелена маса ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	1	Колір	Світло-коричневий
	2	Аромат	Властивий травам
	3	Смак і присмак	Кисло-солодкий
	4	Прозорість	Без зависів
5 (зелена маса ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i> + лимон <i>Citrus limon</i>)	1	Колір	Світло-коричневий
	2	Аромат	Властивий травам
	3	Смак і присмак	Кисло-солодкий
	4	Прозорість	Без зависів
6 (контроль)	1	Колір	безбарвний
	2	Аромат	Нехарактерний
	3	Смак і присмак	Без смаку
	4	Прозорість	Прозорий

Дослідження бактерицидного ефекту функціональних напоїв з імуномодельними екстрактами проводили із застосуванням методу визначення мікробного числа та визначення росту бактерій групи кишкової палички *Escherichia coli* на середовищі Ендо [10].

Дослідження мікробного числа у пробах проводили у чашках Петрі на середовищі МПА. Було взято 5 дослідних проб і контрольна проба. Напої з рослинними екстрактами вносили методом розбризкування на поверхню живильних середовищ. Так званий посів компонентів водних екстрактів на середовища проводили з метою дослідження їх можливої бактерицидної дії на життєздатність загальної кількості мікроорганізмів (колонієутворюючих одиниць, КУО) в 1 см³ (мл) води. Здійснювали посів «газоном» за допомогою спеціальних розприскувачів. У результаті отримали 5 дослідних проб, але кожна – у повторності: 1, 2 – квітки ехінацеї *Echinacea purpurea*; 3, 4 – лимон *Citrus limon*; 5, 6 – лимон *Citrus limon* + квітки ехінацеї *Echinacea purpurea*; 7, 8 – зелена маса ехінацеї *Echinacea purpurea*; 9, 10 – зелена маса

ехінацеї *Echinacea purpurea* + лимон *Citrus limon*; 11 – посів без додаткових компонентів (контроль). Після посіву чашки Петрі з дослідними пробами і контролем були поставлені у термостат для культивування мікроорганізмів за оптимальних температурних умов.

У результаті проведених досліджень отримали наступні результати: у контролі спостерігався ріст більшої кількості колоній, а у пробах № 5, 6 з ехінацеєю та лимоном – значно гальмувався розвиток бактерій. Тобто підтверджений очікуваний бактерицидний ефект напою з імуномодельними екстрактами. Таким чином, запропонований склад функціонального напою при його введенні у харчовий раціон додатково сприятиме підвищенню імунного статусу споживачів. Етапи процесу визначення мікробного числа наведено на рис. 2.

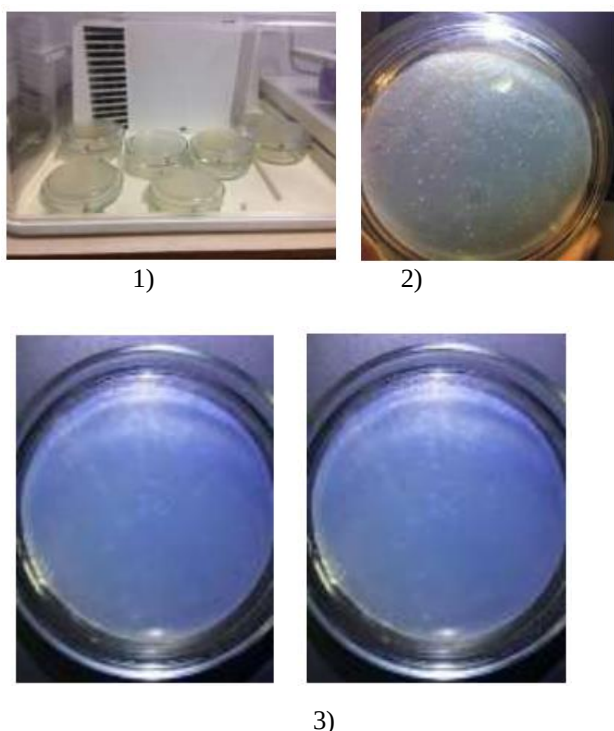


Рис. 2 – Визначення мікробного числа у пробах:
1) культивування проб у термостаті;
2) ріст колоній на МПА в контрольній пробі;
3) ріст колоній на МПА в пробах № 5, 6 (ехінацея+лимон)
Fig. 2 – Determination of microbial count in samples:
1) culturing samples in a thermostat;
2) colony growth on MPA in the control sample;
3) colony growth on MPA in samples No. 5, 6 (echinacea+lemon)

Результати розрахунку мікробного числа показали, що в усіх пробах значення мікробного числа відповідають нормативним вимогам щодо харчових напоїв, а в пробах з додаванням імуномодельюючих екстрактів зафіксовано значно нижчі порівняно з контролем (табл. 3). Отже, імуномодулюючі добавки мають широкий спектр дії на мікробні клітини.

Для визначення колі-індексу приготували середовище Ендо. Після посіву рідини дослідних зразків напоїв на живильні середовища, було проведено культивування за визначених умов відповідно нормативних вимог й визначено показники колі-індексу у пробах (рис. 3).

Результати обчислень наведені в табл. 4. Питна вода, напої безпечні в епідеміологічному відношенні, якщо колі-індекс становить ≤ 3 КУО/дм³ (3 клітини лактозопозитивних бактерій групи кишкової палички *Escherichia coli* в 1 дм³ води).

Значення санітарно-гігієнічних показників в усіх дослідних пробах відповідали вимогам стандарту щодо якості питної води та напоїв. Відмічено, що значення колі-індексу у

Таблиця 3 – Визначення мікробного числа у пробах
Table 3 – Microbial count determination in samples

Проба	Мікробне число, КУО/см ³
1 (квітки ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	20
2 (квітки ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	21
3 (лимон <i>Citrus limon</i>)	33
4 (лимон <i>Citrus limon</i>)	32
5 (лимон + квітки ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	10
6 (лимон + квітки ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	13
7 (зелена маса ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	21
8 (зелена маса ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	22
9 (зелена маса ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i> + лимон <i>Citrus limon</i>)	20
10 (зелена маса ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i> + лимон <i>Citrus limon</i>)	21
11 (контроль)	45

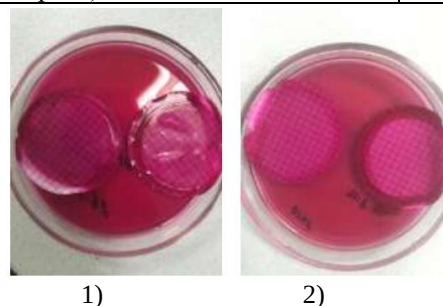


Рис. 3 – Визначення колі-індексу у пробах:
1) контроль;
2) проби № 5, 6 (ехінацея+лимон)
Fig. 3 – Determination of coliform index in samples:
1) control;
2) samples No. 5, 6 (echinacea+lemon)

Таблиця 4 – Визначення колі-індексу у пробах
Table 4 – Coliform index determination in samples

Проба	Колі-індекс КУО/дм ³
1 (квітки ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	0
2 (квітки ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	0
3 (лимон <i>Citrus limon</i>)	2
4 (лимон <i>Citrus limon</i>)	2
5 (лимон + квітки ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	0
6 (лимон + квітки ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	0
7 (зелена маса ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	1
8 (зелена маса ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i>)	1
9 (зелена маса ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i> + лимон <i>Citrus limon</i>)	1
10 (зелена маса ехінацеї <i>Echinacea purpurea</i> + лимон <i>Citrus limon</i>)	1
11 (контроль)	3

досліджуваних пробах з рослинними екстрактами мали менші кількісні значення порівняно з контролем. Це свідчить про

пригнічення росту бактерій групи кишкової палички *Escherichia coli* при використанні імуномодуючих добавок у напої на основі ехінацеї та лимону. У пробах з квітками ехінацеї та квітками ехінацеї + лимон колі-індекс дорівнює нулю.

Також було проведено математичну статистичну обробку експериментальних даних. За результатами визначення похибок, а саме комплексного статистичного аналізу отриманих

експериментальних даних при коефіцієнті нормованих відхилень $t = 2,77$ за таблицею критичних значень t -критерія Стюдента, ступінь свободи становить $df = 4$, відповідає рівню значущості $p = 0,05$, що підтверджується незначними відхиленнями похибок. Дані результатів математичної статистичної обробки експериментальних даних наведені у табл. 5.

Таблиця 5 – Результати математичної статистичної обробки даних
Table 5 – Results of mathematical statistical data processing

Назва зразків	Середнє значення вибірки	Стандартне відхилення, S	Стандартне відхилення середнього арифметичного S_x	Похибка середнього результату, E_a	Коефіцієнт нормованих відхилень, t
Контроль	45	1	0,57	1,579	2,77
Дослід	10	1	0,57	1,579	2,77

Наукова новизна роботи полягає у додаванні імуномодуючого рослинного екстракту на основі *Echinacea purpurea* та *Citrus limon* для надання функціональних властивостей питній, мінеральній воді торгової марки BUVETTE як важливого харчового продукту щоденного використання, що сприятиме підвищенню популяційного здоров'я та імунного статусу представників населення.

Практичною цінністю роботи є отримання функціонального імуномодуючого напою з бактерицидним ефектом за умов оптимізації використання ресурсу мінеральних вод, що сприятиме збереженню природних вод

4. ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що на сьогодні спостерігається тенденція щодо зростання негативного антропогенного впливу на екологічний стан та якість природних мінеральних вод. Крім цього, нераціональне використання водних ресурсів загрожує глобальною кризою для людства. Значною проблемою є систематичне забруднення водоносних горизонтів внаслідок дії природних та техногенних факторів. Підвищення якості напоїв з природної питної води шляхом застосування біоактивних добавок сприяє збагаченню їх хімічного складу та покращенню санітарно-гігієнічних показників.

2. Запропоновано біотехнологічне рішення щодо отримання функціонального напою на основі мінеральної води з додаванням біологічно активних речовин рослинних екстрактів *Echinacea purpurea* та *Citrus limon*, що

сприятиме забезпеченню споживачів напоями з імуномодуючими властивостями, покращенню якості води питних напоїв, зменшенню негативного впливу біологічних та інших забруднень на якість напоїв та оптимізації використання ресурсу мінеральних вод. Запропоновані напої з рослинними екстрактами на основі *Echinacea purpurea* та *Citrus limon* збагачені на полісахариди, ефірну олію, алкалоїди, глікозиди, пальмітинову, лінолеву та церотинову кислоти, на каротини, аскорбінову кислоту та інші вітаміни, що позитивно впливатимуть як важливий харчовий продукт щоденного використання на імунну систему організму споживача.

3. Визначено, що якість вихідної мінеральної води природного походження торгової марки BUVETTE ТОВ «Ізумруд-ЛТД» та функціональні напої з додаванням біоактивних рослинних екстрактів на основі *Echinacea purpurea* та *Citrus limon* відповідають нормативним вимогам за органолептичними показниками та результатами біотестування.

4. Встановлено, що додавання до напоїв імуномодуючого рослинного екстракту на основі *Echinacea purpurea* та *Citrus limon* покращує їх якість за санітарно-гігієнічними показниками, про що свідчить зниження мікробного числа питних напоїв більше ніж на 60 % порівняно з контролем, а показники колі-індексу досягають нульових значень. Це підтверджує бактерицидну дію напоїв завдяки додаванню біологічно активних речовин у складі рослинних екстрактів, що сприятиме підвищенню імунної відповіді та зниженню захворюваності у споживачів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Васютинська К.А., Барбашев С.В., Кімінчиджи М.І. Небезпека створення дефіциту водних ресурсів у регіонах України в умовах урбанізації. *Екологічні науки*. 2020. № 4(31). С. 42-47. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.6>.
2. Прибилюський В.Л., Дулька О.С., Федосов О.Л. Перспективи знезараження води в технологіях бутильованих питних вод / Sustainable food chain and safety through science, knowledge and business: scientific monograph. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2023. P. 174–207.
3. Кичко І.І., Холодницька А.В. Рациональне водокористування в контексті забезпечення населення якісною питною водою, збереження здоров'я та тривалості життя. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2021. № 2(26). С. 7–17.
4. Хільчевський В.К. Водна політика: світові тенденції, стан в Україні. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2023. № 4(70), С. 6-22. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.4.1>.
5. Strokal V.P., Kovpak A.V. The basin approach for water resources management in Ukraine: the SWOT analysis. *Biological Systems: Theory and Innovation*. 2020. Vol. 11, № 4, P. 35-56. <http://dx.doi.org/10.31548/biologiya2020.04.004>.
6. Zhang Y., Li M., Dong J., Yang H., Van Zwieten L., Lu H., Wang H. A critical review of methods for analyzing freshwater eutrophication. *Water*. 13(2), 225. <https://doi.org/10.3390/w13020225>.
7. Водна стратегія України на період до 2050 року. Схвалено розпорядженням КМ України від 9.12.2022 р. № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text>
8. Sonarghare P.C., Masram S.C., Sonparote U.R., Khaparde K.P., Kharkate S.K. Causes and effects of eutrophication on aquatic life (a review). *International Journal for Environmental Rehabilitation and Conservation*. 2020. No XI. P. 213-218. URL: <https://eoi.citefactor.org/10.11208/essence.20.11.SP2.147>.
9. Proskurnin O., Tsapko N., Ivashchenko T., Vasilenko S., Belokon K., Zakharchenko N., Teliura N. Standardizing the Wastewater Composition in Order to Minimize the Eutrophication Risk for the Reservoir. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. No 25(6). P. 144-152. <https://doi.org/10.12911/22998993/186822>.
10. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. Київ. МОЗ України. 2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>.

REFERENCES

1. Vasiutynska K. A., Barbashev S. V., Kiminchydzhy M. I. The danger of creating a shortage of water resources in the regions of Ukraine under conditions of urbanization. *Odeskyi natsionalnyi politekhnichnyi universytet, Naukovo-praktychnyi zhurnal «Ekolohichni nauky»*. Odesa, 2020. № 4(31). S. 42-47. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.6>.
2. Prybylskyi V. L., Dulka O. S., Fedosov O. L. Prospects for water disinfection in bottled drinking water technologies. *Sustainable food chain and safety through science, knowledge and business : scientific monograph*. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023. P. 174–207.
3. Kychko I.I., Kholodnytska A.V. Rational water use in the context of providing the population with high-quality drinking water, preserving health and longevity. *Problemy i perspektyvy ekonomiky ta upravlinnia*. 2021. № 2(26). S. 7–17.
4. Khilchevskyi, V. K. Water policy: global trends, situation in Ukraine. *Naukovyi zbirnyk «Hidrolohiia, hidrokhiimiia i hidroekolohiia»*. Kyiv : Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka, 2023, № 4(70), С. 6-22. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.4.1>.
5. Strokal, V. P., Kovpak, A. V. The basin approach for water resources management in Ukraine: the SWOT analysis. *Scientific journal «Biological Systems: Theory and Innovation»*, 2020, Том 11, №4, p. 35-56. URL: <http://dx.doi.org/10.31548/biologiya2020.04.004>.
6. Zhang, Y., Li, M., Dong, J., Yang, H., Van Zwieten, L., Lu, H., & Wang, H. A critical review of methods for analyzing freshwater eutrophication. *Water*, 13(2), 225. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13020225>.
7. Vodna stratehiia Ukrainy na period do 2050 roku. Skhvaleno rozporiadzhenniam KM Ukrainy vid 9.12.2022 r. № 1134-r. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text>.
8. Sonarghare, P. C., Masram, S. C., Sonparote, U. R., Khaparde, K. P., & Kharkate, S. K. (2020). Causes and effects of eutrophication on aquatic life (a review). *International Journal for Environmental Rehabilitation and Conservation*, 2020, XI, 213-218. URL: <https://eoi.citefactor.org/10.11208/essence.20.11.SP2.147>.
9. Chugai, A. V., Dontsov, M. Yu., & Koshelev, V. D. (2025). Otsinka ekolohichnoi bezpeky mist Odeskoi promyslovomiskoi ahlomeratsii [Assessment of environmental safety of cities of the Odesa industrial-urban agglomeration]. In *Transformatsiini pidkhody do staloho rozvytku: ekolohichna osvita, nauka ta pryrodookhoronni praktyky dlia vidbudovy Ukrainy*. Zhytomyr: Zhytomyrska Politekhnikha, pp. 15–16). (in Ukr.)
10. DСанПіН 2.2.4-171-10. Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoj dlia spozhyvannia liudynoiu. Kyiv. MOZ Ukrainy. 2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>

INNOVATIVE FOOD BIOTECHNOLOGY FOR PRODUCING A FUNCTIONAL BEVERAGE WITH BACTERICIDAL EFFECT UNDER CONDITIONS OF OPTIMIZED USE OF MINERAL WATER RESOURCES

¹A. V. Pasenko, ²I. O. Soloshych

¹ Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, University Street, Kremenchuk,, 39600, Ukraine
pasenkoalena2015@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1108-0408>

² Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, University Street, Kremenchuk,, 39600, Ukraine
soloishych@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-8842-5120>

The development of innovative solutions aimed at improving the quality of food products based on underground mineral waters, under conditions of their rational use, will contribute to aligning the country with European legislative requirements regarding water resource management, as well as their environmentally oriented restoration and protection. One of the key directions for ensuring the conservation of mineral water resources and sources of fresh drinking water is the maximum utilization of their valuable nutritional components, especially in urbanized and densely populated areas. The use of immunomodulating additives in mineral waters will not only improve the quality indicators of beverages but also contribute to the optimization of groundwater resource use. Providing drinking products with immunomodulating properties and a bactericidal effect will supply the consumer's body with a complex of vitamins and biologically active substances in a shorter time compared to conventional mineral water. The aim of this study is to analyze innovative food biotechnology for producing a functional beverage with a bactericidal effect under conditions of optimized use of mineral water resources. The object of the study is the biotechnology of producing an environmentally safe drinking product with immunomodulating properties. The subject of the research is the quality assessment of a mineral water-based drinking product with the addition of an immunomodulating plant extract to enhance the immune status of the population under martial law conditions. The study employed theoretical methods (analysis, synthesis, generalization, comparison, and systematization of scientific sources and regulatory documents), empirical methods (assessment of drinking water quality indicators; determination of the sanitary-hygienic coli index; determination of microbial count; biotesting), as well as methods of interpretation and generalization of results, which made it possible to evaluate the main quality indicators of a functional immunomodulating beverage with a bactericidal effect. The scientific novelty of the work lies in the addition of an immunomodulating plant extract based on *Echinacea purpurea* and *Citrus limon* to impart functional properties to drinking mineral water of the BUVETTE brand, an important daily food product. This approach contributes to improving public health and the immune status of the population. The practical significance of the work lies in obtaining a functional immunomodulating beverage with a bactericidal effect under conditions of optimized use of mineral water resources, which contributes to the conservation of natural water resources.

It has been determined that the quality of the original natural mineral water of the BUVETTE brand (LLC "Izumrud-LTD") and the functional beverages with added bioactive plant extracts based on *Echinacea purpurea* and *Citrus limon* meet regulatory requirements according to organoleptic indicators and biotesting results. The addition of the immunomodulating plant extract improves the sanitary and hygienic quality indicators, as evidenced by a reduction in the microbial count of drinking beverages by more than 60% compared to the control, while coli-index values reach zero. This confirms the bactericidal effect of the beverages due to the presence of biologically active substances in plant extracts, which will contribute to enhancing immune response and reducing morbidity among consumers

Keywords: innovative food biotechnology, environmental issues of water resources, mineral waters, drinking water quality, functional beverage, immunomodulating extract, *Echinacea purpurea*, *Citrus limon*, bactericidal effect, biotesting, sanitary-hygienic water quality indicators, microbial count, coli-index, *Escherichia coli*.

Подання до редакції : 20. 01. 2026

Надходження остаточної версії : 24. 03. 2026

Публікація статті : 25. 05. 2026

УДК 502.131.1:69.059.7:691.11

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ MASS TIMBER У СТРАТЕГІЇ NET ZERO ТА ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ (НА ПРИКЛАДІ М. ХАРКОВА)

Н.В. Внукова, В.С. Слобожанюк

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків
vnukovanv@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-4097-864X>

У роботі досліджено потенціал інтеграції технологій Mass Timber (CLT, Glulam) у стратегії декарбонізації будівельного сектору відповідно до концепції Net Zero та потреб післявоєнного відновлення України. Проведено порівняльний аналіз техніко-економічних і екологічних характеристик дерев'яних інженерних конструкцій та традиційних залізобетонних систем. Для оцінювання вуглецевого сліду застосовано методологію оцінки життєвого циклу (LCA) відповідно до стандартів ISO 14040/14044 на стадіях A1–A3 (Cradle-to-Gate). Встановлено, що використання Mass Timber забезпечує зниження втіленого вуглецю, скорочення термінів будівництва, підвищення енергоефективності будівель та формування позитивного вуглецевого балансу завдяки довгостроковому депонуванню CO₂ у деревині. На основі математичного моделювання визначено, що 1 м³ конструкційної деревини здатний акумулювати близько 917 кг CO₂. Досліджено ресурсний потенціал Північно-Східного регіону України та обґрунтовано можливість створення регіонального Mass Timber-кластера для забезпечення потреб відновлення житлової інфраструктури. Запропоновано практичні рекомендації щодо локалізації виробництва CLT, адаптації нормативної бази до вимог Eurocode 5, реалізації демонстраційних проєктів та впровадження механізмів монетизації вуглецевих ефектів через ринки вуглецевих кредитів. Отримані результати підтверджують доцільність використання технологій Mass Timber як одного з ключових інструментів сталого післявоєнного відновлення та декарбонізації будівельного сектору України.

Ключові слова: Mass Timber, Net Zero, стале будівництво; депонування CO₂; дерев'яні інженерні конструкції

1. ВСТУП

Будівельний сектор є одним із найбільших джерел викидів парникових газів, формуючи близько 37 % глобальних енергетично пов'язаних викидів CO₂ [1]. У зв'язку з цим пріоритетним напрямом сучасного будівництва стає скорочення «втіленого вуглецю» (embodied carbon) та впровадження низьковуглецевих технологій відповідно до цілей кліматичної нейтральності та концепції Net Zero [2].

Одним із перспективних рішень є технології Mass Timber (CLT, Glulam), які поєднують високі конструктивні характеристики із здатністю довгострокового депонування вуглецю та меншим вуглецевим слідом порівняно з традиційними будівельними матеріалами.

Для України актуальність цієї проблематики значно посилюється в умовах післявоєнного

відновлення житлової та міської інфраструктури. Масштабні руйнування вимагають впровадження інноваційних будівельних рішень, здатних забезпечити одночасно швидкість відбудови, ресурсну ефективність та екологічну стійкість. У цьому контексті інтеграція технологій Mass Timber може стати одним із інструментів реалізації принципів сталого розвитку та декарбонізації будівельного сектору України [3].

Метою дослідження є науково-методичне обґрунтування ролі та ефективності інтеграції технологій Mass Timber (CLT, Glulam) у стратегії декарбонізації будівельного сектору (Net Zero) та формування моделей сталого післявоєнного відновлення міської інфраструктури України. У межах досягнення мети передбачено оцінювання техніко-економічних та екологічних характеристик дерев'яних інженерних конструкцій у порівнянні

з традиційними матеріалами, визначення їхнього потенціалу скорочення втілених викидів вуглецю (embodied carbon) на основі LCA-підходу відповідно до ISO 14040/14044, а також аналіз можливостей локалізації виробництва Mass Timber із використанням регіональної сировинної бази для формування інноваційних кластерів відновлення територій України.

2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні застосовано міждисциплінарний підхід, що поєднує методи порівняльного аналізу, оцінки життєвого циклу (LCA) та математичного моделювання вуглецевого балансу в контексті концепції Net Zero.

На першому етапі проведено порівняння традиційних залізобетонних конструкцій і систем Mass Timber (CLT, Glulam) за техніко-економічними та екологічними показниками (маса, тривалість монтажу, теплотехнічні характеристики, вуглецевий слід), що дозволило оцінити їх ефективність для швидкого відновлення інфраструктури [4].

Другим етапом виконано LCA-аналіз відповідно до ISO 14040/14044 для стадій A1–A3 з визначенням embodied carbon, що підтвердило нижчий вуглецевий слід дерев'яних конструкцій

порівняно з традиційними матеріалами. Функціональна одиниця виміру - 1 м³ конструкційного матеріалу [5].

Додатково застосовано модель вуглецевого балансу деревини для кількісної оцінки потенціалу депонування CO₂ у Mass Timber, що створює основу для подальшої оцінки кліматичних ефектів та можливого використання вуглецевих кредитів.

Також проаналізовано регіональну ресурсну базу Північно-Східної України (Харківська, Сумська, Полтавська області) з позиції потенціалу локалізації виробництва та формування кластеру Mass Timber як елементу післявоєнного відновлення.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У ході дослідження проведено комплексне техніко-економічне та екологічне порівняння будівельних матеріалів із фокусом на системи Mass Timber та традиційні залізобетонні конструкції. Результати, наведені в табл. 1, демонструють переваги дерев'яних інженерних рішень за основними критеріями, що мають ключове значення для швидкого та ефективного відновлення міської інфраструктури м. Харкова.

Таблиця 1 - Порівняльна характеристика конструктивних систем
Table 1 – Comparative Characteristics of Structural Systems

Параметр	Залізобетон	Mass Timber (CLT/Glulam)	Ефект
Питома маса	~2500 кг/м ³	~500 кг/м ³	Зменшення ваги у 5 разів
Термін монтажу	100% часу	35% часу	Прискорення будівництва у 3 рази
Теплопровідність	~1.7 Вт/(м·К)	~0.13 Вт/(м·К)	Підвищення енергоефективності стін
Вуглецевий слід	Емісія (+450 кг)	Секвестрація (–800 кг)	Декарбонізація на рівні –1250 кг/м ³

У результаті дослідження встановлено, що застосування технологій Mass Timber сприяє не лише скороченню термінів відбудови житлової інфраструктури, але й істотно знижує навантаження на існуючі пошкоджені фундаменти завдяки малій масі конструкцій [8]. Крім того, такі рішення забезпечують підвищений рівень енергоефективності будівель уже на базовому конструктивному рівні.

Проведено розрахунок показника «втіленого вуглецю» (embodied carbon) для огорожувальних конструкцій із CLT відповідно до стандартів ISO 14040/14044 на стадіях A1–A3 (Cradle-to-Gate), що охоплюють основні етапи виробництва. Встановлено, що енергетичні

витрати на виготовлення CLT, включаючи заготівлю деревини, сушіння та пресування, є на 50–70% нижчими, ніж при виробництві еквівалентного обсягу залізобетонних конструкцій [6].

У межах оцінки вуглецевого балансу визначено, що сумарні викиди CO₂, пов'язані з виробництвом CLT-панелей (з урахуванням транспортування, застосування клейових систем та споживання енергії), становлять близько 12–15% від кількості вуглецю, акумульованого в деревній структурі матеріалу.

Отримані результати свідчать про потенційну можливість досягнення дуже низького, а за окремих умов - навіть від'ємного значення

глобального потенціалу потепління (GWP) [7] на етапі виробництва, що підтверджує екологічну

ефективність застосування технологій Mass Timber у проєктах відновлення.

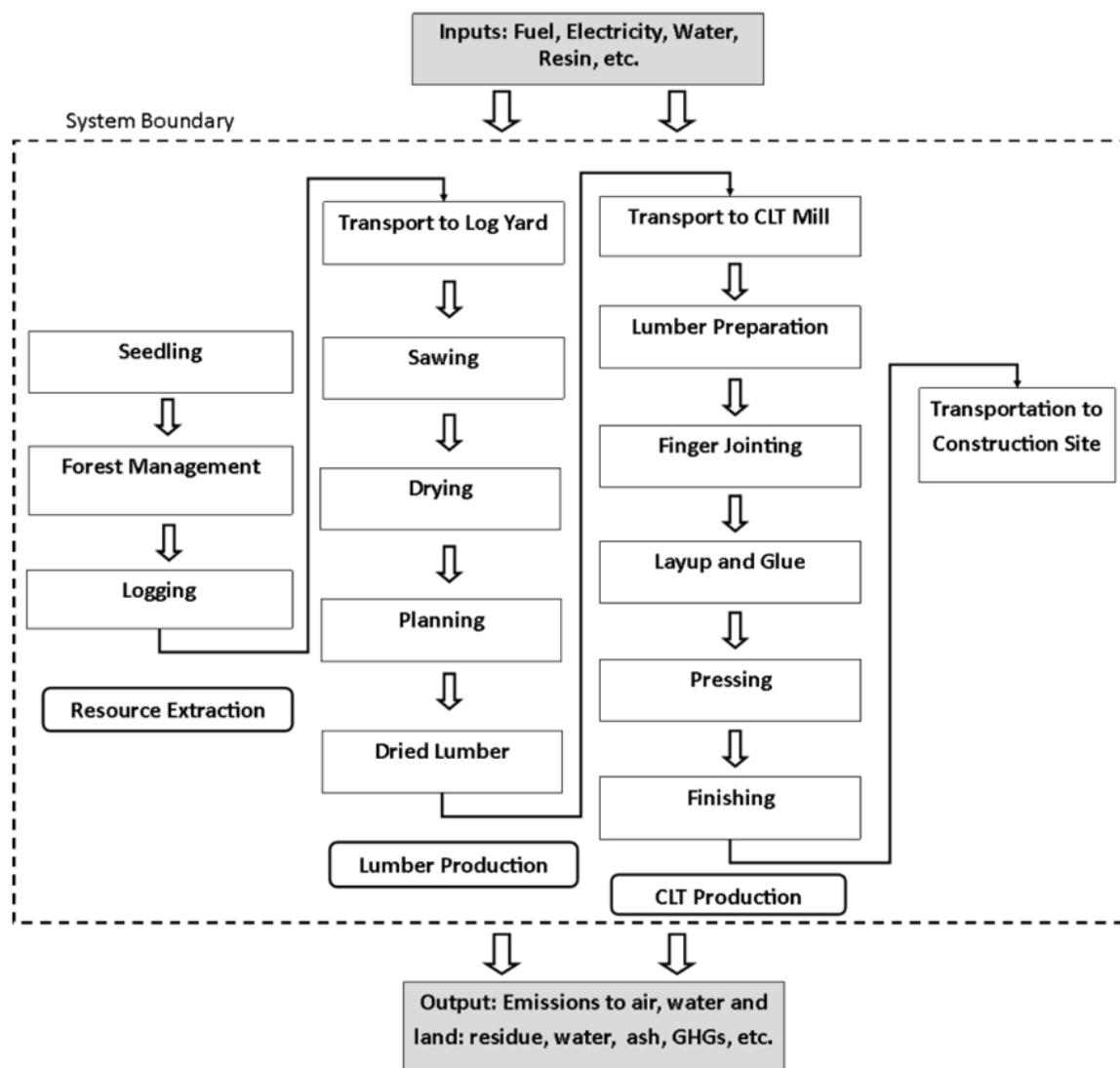


Рис. 1 – LCA-модель виробництва дерев'яних інженерних панелей

Fig. 1 – Life Cycle Assessment (LCA) Model for the Production of Engineered Wood Panels

Застосована у дослідженні математична модель забезпечила можливість кількісної оцінки екологічного потенціалу досліджуваного матеріалу. Методика відповідає підходам FAO та IPCC щодо оцінки вуглецю в біомасі.

Визначення обсягів депонованого вуглецю на основі щільності деревини та вмісту целюлози за формулою:

$$C_{\text{store}} = V \cdot \rho \cdot f_c \cdot (M_{\text{CO}_2} / M_c), \quad (1)$$

де V - об'єм матеріалу, ρ - щільність, f_c - частка вуглецю в біомасі,

M - молекулярні маси.

Основні аспекти розрахунку:

Концентрація вуглецю f_c : Для хвойних порід (сосна), що переважають у лісах північно-

східного регіону України, частка вуглецю в сухій біомасі становить $\sim 50\%$ ($f_c \approx 0.5$).

Молекулярна конверсія M_{CO_2} / M_c Коефіцієнт 3,67 відображає перерахунок маси чистого вуглецю в об'єм поглинутого з атмосфери вуглекислого газу.

Розрахунок за даною формулою доводить, що за щільності $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ кожен кубометр конструкції «консервує» $\sim 917 \text{ кг CO}_2$.

$$C_{\text{store}} = 500 \cdot 0.5 \cdot 3.67 \approx 917 \text{ кг CO}_2 / \text{м}^3$$

Це підтверджує доцільність використання запропонованої моделі як базової платформи для подальшої капіталізації екологічних ефектів, зокрема через механізми вуглецевого ринку та

отримання вуглецевих кредитів у межах реалізації програм відновлення Харківської області.

З метою оцінки можливостей впровадження Mass Timber у регіональному контексті здійснено аналіз сировинної бази та потенціалу локалізації виробництва. Результати кластерного аналізу лісових ресурсів Північно-Східної України свідчать про достатній рівень забезпеченості деревиною для організації виробництва інженерної деревини. Загальна площа лісового фонду Харківської, Сумської та Полтавської областей становить понад 1,2 млн га, при цьому переважають сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) та дуб звичайний (*Quercus robur*), які відповідають класам міцності C24/D30 і є придатними для конструкційного використання.

Додатково встановлено наявність значної логістичної переваги: географічне положення м. Харкова як великого транспортного вузла забезпечує ефективну організацію ланцюгів постачання із середньою відстанню транспортування сировини 200–250 км, що сприяє зниженню непрямих викидів CO₂, пов'язаних із логістичними процесами, відповідно до підходів оцінки життєвого циклу (LCA).

Окремо визначено високий потенціал для промислового розвитку виробництва CLT. Наявна в Харківському регіоні розвинена машинобудівна та деревообробна інфраструктура створює передумови для формування спеціалізованого Mass Timber-кластера з орієнтовною потужністю 30–50 тис. м³ на рік, який потенційно може забезпечити значну частину потреб регіону у відновленні житлового фонду.

Отримані результати підтверджують, що технології Mass Timber мають значний кліматичний потенціал у контексті реалізації стратегій Net Zero, оскільки забезпечують зниження втіленого вуглецю (embodied carbon) до від'ємних значень, а також формують довгострокове депонування атмосферного CO₂ у структурі деревини. Це дозволяє розглядати Mass Timber як потенційний елемент національних та регіональних стратегій декарбонізації будівельного сектору.

Водночас, незважаючи на суттєві екологічні та техніко-економічні переваги, впровадження технологій Mass Timber в Україні супроводжується низкою обмежень. Зокрема, до ключових технічних бар'єрів належить неповна імплементація європейського нормативного

середовища Eurocode 5 [11], а також обмежений практичний досвід проектування та зведення багатоповерхових дерев'яних конструкцій. Окремо слід враховувати аспекти будівельної безпеки, зокрема підвищені вимоги до пожежної стійкості та необхідність інкапсуляції дерев'яних елементів для забезпечення нормативної межі вогнестійкості. Економічні обмеження пов'язані з відносно високою початковою вартістю виробництва CLT, а також технологічною залежністю від клеєвих систем та імпорتنних компонентів, що може впливати на масштабованість впровадження даної технології в умовах післявоєнного відновлення.

4. ВИСНОВКИ

Проведене дослідження засвідчує, що впровадження технологій Mass Timber є стратегічно важливим напрямом для післявоєнного відновлення як України так і міста Харкова в контексті декарбонізації будівельного сектору та реалізації цілей Net Zero.

Використання CLT- та Glulam-систем дозволяє одночасно досягти таких ефектів:

1. Технічний ефект: зменшення маси конструкцій до 4–5 разів у порівнянні з залізобетонем, що знижує вимоги до фундаментів і дозволяє відновлення без їх повного посилення.

2. Часовий ефект: скорочення тривалості будівельно-монтажних робіт на 60–70% завдяки високому рівню заводської префабрикації.

3. Екологічний ефект: формування позитивного вуглецевого балансу, оскільки 1 м³ деревини акумулює в середньому 800–900 кг CO₂, що узгоджується з підходами до climate-positive будівництва.

Практичні рекомендації.

1. Формування регіонального Mass Timber-кластера. Доцільним є створення виробничо-інноваційного кластера на базі промислових майданчиків Харківського регіону з метою локалізації виробництва CLT. Це дозволить знизити вартість будівництва на 20–25% та зменшити залежність від імпорتنних поставок.

2. Нормативна адаптація будівельної бази. Необхідно гармонізувати національні будівельні норми з Eurocode 5 (EN 1995) для забезпечення проектування багатоповерхових дерев'яних будівель з урахуванням вимог пожежної та сейсмостійкості.

3. Пілотний проєкт демонстраційної забудови. Рекомендується реалізація пілотного

проекту «Зелений квартал» із використанням гібридної конструктивної системи (залізобетон + Mass Timber) на території Північної Салтівки як демонстраційного кейсу для міжнародних фінансових інституцій (EIB, EBRD, NEFCO).

4. Механізм монетизації вуглецевого ефекту. Доцільно розробити систему верифікації та обліку депонованого CO₂ у будівлях для подальшого виходу на ринки вуглецевих кредитів (Voluntary Carbon Market). Це відповідає підходам World Bank Carbon Markets Report Отримані кошти можуть бути спрямовані на фінансування соціального житла.

5. Підготовка кадрового потенціалу. Рекомендується впровадження спеціалізованих освітніх програм з ВІМ-проектування та розрахунку дерев'яних конструкцій на базі профільних ЗВО (ХНУБА, ХНУМГ) відповідно до європейських практик цифрового будівництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. IPCC (2022). AR6 WGIII. URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
1. Advancing Net Zero: Embodied Carbon. World Green Building Council. URL: [https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/European Green Deal](https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/European-Green-Deal).
2. European Green Deal. European Commission. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
3. EN 15978:2011 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance.
4. Karacabeyli, E., & Douglas, B. (2013). CLT Handbook: Cross-Laminated Timber. FPIInnovations.
5. Peñaloza, D., Erlandsson, M., & Berglund, L. (2016). Life cycle assessment of multi-storey buildings made of cross-laminated timber (CLT) in Sweden. Environmental Science & Policy
6. Brandner, R. (2013). Cross laminated timber (CLT) in Europe: state of the art. University of Graz.
7. Sathre, R., & O'Connor, J. (2010). A Synthesis of Research on the Environmental Efficiencies of Wood Technologies in Construction. Vancouver: FPIInnovations.
8. Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P., et al. (2020). Buildings as a global carbon sink. Nature Sustainability, 3(4), 269-276.
9. Torgert, G., & Lattke, F. (2018). Timber construction in Europe: Innovation and sustainability. Journal of Architectural Engineering.
10. FAO (2020). Global Forest Resources Assessment. URL: <https://www.fao.org/home/en/>
11. EN 1995-1-1 (Eurocode 5). Timber structures. URL: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-5-design-timber-structures>

REFERENCES

1. IPCC (2022). AR6 WGIII. URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>
1. Advancing Net Zero: Embodied Carbon. World Green Building Council. URL: [https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/European Green Deal](https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/European-Green-Deal).
2. European Green Deal. European Commission. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
3. EN 15978:2011 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance.
4. Karacabeyli, E., & Douglas, B. (2013). CLT Handbook: Cross-Laminated Timber. FPIInnovations.
5. Peñaloza, D., Erlandsson, M., & Berglund, L. (2016). Life cycle assessment of multi-storey buildings made of cross-laminated timber (CLT) in Sweden. Environmental Science & Policy
6. Brandner, R. (2013). Cross laminated timber (CLT) in Europe: state of the art. University of Graz.
7. Sathre, R., & O'Connor, J. (2010). A Synthesis of Research on the Environmental Efficiencies of Wood Technologies in Construction. Vancouver: FPIInnovations.
8. Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P., et al. (2020). Buildings as a global carbon sink. Nature Sustainability, 3(4), 269-276.
9. Torgert, G., & Lattke, F. (2018). Timber construction in Europe: Innovation and sustainability. Journal of Architectural Engineering.
10. FAO (2020). Global Forest Resources Assessment. URL: <https://www.fao.org/home/en/>
11. EN 1995-1-1 (Eurocode 5). Timber structures. URL: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-5-design-timber-structures>

INTEGRATION OF MASS TIMBER TECHNOLOGIES INTO NET ZERO STRATEGIES AND POST-WAR RECONSTRUCTION OF URBAN INFRASTRUCTURE IN UKRAINE (CASE STUDY OF KHARKIV)

N. V. Vnukova, V. S. Slobozhaniuk

Kharkiv National Automobile and Highway University
25 Yaroslava Mudroho Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

vnukovanv@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4097-864X>

The study investigates the potential of integrating Mass Timber technologies, including Cross-Laminated Timber (CLT) and Glued Laminated Timber (Glulam), into building sector decarbonization strategies in accordance with the Net Zero concept and the requirements of post-war reconstruction in Ukraine. A comparative assessment of the technical, economic, and environmental performance of engineered timber systems and conventional reinforced concrete structures was conducted. The carbon footprint of construction materials was evaluated using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in compliance with ISO 14040/14044 standards for the A1–A3 (Cradle-to-Gate) stages. The results demonstrate that Mass Timber technologies contribute to significant reductions in embodied carbon, accelerated construction processes, improved building energy efficiency, and the establishment of a positive carbon balance through long-term carbon sequestration in wood. Mathematical modelling showed that 1 m³ of structural timber can store approximately 917 kg of CO₂. The resource potential of North-Eastern Ukraine was analysed, confirming favourable conditions for the establishment of a regional Mass Timber cluster capable of supporting large-scale housing and infrastructure reconstruction. Practical recommendations are proposed regarding the localization of CLT production, adaptation of national regulations to Eurocode 5 requirements, implementation of pilot demonstration projects, and development of mechanisms for monetizing carbon benefits through voluntary carbon markets. The findings confirm that Mass Timber technologies can serve as one of the key instruments for sustainable post-war recovery and decarbonization of Ukraine's construction sector.

Keywords: Mass Timber; CLT; Glulam; Net Zero; sustainable construction; embodied carbon; carbon sequestration; engineered timber structures; post-war reconstruction; decarbonization.

*Подання до редакції : 26. 02. 2026
Надходження остаточної версії : 22. 04. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026*

УДК 614.1:616.12-008-039.1]:551.586(477)

СЕЗОННА СКЛАДОВА РИЗИКУ СМЕРТНОСТІ НАСЕЛЕННЯ УКРАЇНИ ВІД ХВОРОБ СИСТЕМИ КРОВООБІГУ

Н. В. Грабко

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова,
вул. Всеволода Змієнка, 2, 65000, Одеса, Україна, grabkonatalyavikt@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1412-5683>

Важливою особливістю смертності населення в різних країнах світу є сезонна складова. Це означає, що в холодний період року кількість смертей зростає у порівнянні з теплим. Таке явище майже не описане у вітчизняних наукових публікаціях, проте знайшло важливі підтвердження у дослідженнях зарубіжних авторів.

Представлене дослідження присвячено вивченню та статистичному підтвердженню сезонної складової показника кількості смертей від хвороб системи кровообігу на тлі смертності від усіх причин, а також визначенню ризиків надлишкової смертності, обумовлених роллю сезонного фактора.

Для реалізації мети дослідження було проаналізовано часові ряди кількості смертей населення від усіх причин і від хвороб системи кровообігу (включаючи 2 нозологічні форми цього класу хвороб), виявлена спочатку графічно, а далі підтверджено статистично наявність основного періоду в 12 місяців. Підтвердження присутності цього періоду смертності населення дозволило оцінити такі характеристики екологічного ризику, як співвідношення шансів і відносний ризик надлишкової смертності населення України в зимовий період року у порівнянні з літнім.

У проведеному дослідженні широко застосовувалися графічний, статистичні (кореляційний аналіз і аналіз Фур'є) та матричний (побудування і аналіз таблиць спряженості) методи досліджень.

Результатами проведеної роботи стали оцінки показників співвідношення шансів (6,7-26,2 % для усіх причин смерті, 8,5-26,7 % для хвороб системи кровообігу, 8,1-31,4 % для ішемічної хвороби серця, 10,2-26,3 % для цереброваскулярних хвороб) і відносного ризику (6,2-26,1 % для усіх причин смерті, 8,2-26,6 % для хвороб системи кровообігу, 8,1-31,1 % для ішемічної хвороби серця, 10,2-26,3 % для цереброваскулярних хвороб) надлишкової смертності населення взимку у порівнянні з літнім періодом.

Отримані результати свідчать про те, що екологічні ризики надлишкової смертності населення України переважно визначаються відповідними характеристиками ризиків від хвороб системи кровообігу на тлі цілого комплексу екологічних факторів, що є типовими саме для холодного періоду року.

Ключові слова: надлишкова смертність, хвороби системи кровообігу, зимовий сезон, співвідношення шансів, відносний ризик

1. ВСТУП

Явище «надлишкової смертності» представляє собою один з важливіших факторів, що визначають актуальність вивчення ролі природних умов у формуванні смертності населення. Одним з прикладів надлишкової смертності є підвищення кількості померлих у холодний період року у порівнянні з теплим, що є досить відомим явищем. Проте, у вітчизняній науковій літературі сезонність смертності населення описана обмежено, а її пояснення досить узагальнені.

У першу чергу це стосується хвороб системи кровообігу (серцево-судинних хвороб), що є основною причиною смертності як в нашій країні,

так і у світі в цілому. Актуальність вивчення впливу екологічних умов на захворюваність і смертність від хвороб системи кровообігу дозволила сформулювати мету дослідження – це виявлення і статистичне підтвердження сезонної складової надлишкової смертності населення України в останні роки, у тому числі від хвороб системи кровообігу, вивчення причин, що обумовлюють таку сезонність, а також визначення і аналіз ризиків підвищення смертності, обумовленого сезонною складовою.

Об'єктом дослідження стала надлишкова смертність населення України від усіх причин і

від хвороб системи кровообігу за період до початку бойових дій (останнє може істотно викривити роль інших зовнішніх факторів у формуванні показника смертності), обумовлена сезонністю.

Предмет дослідження – оцінка відносних ризиків збільшення смертності населення під впливом несприятливих умов зимового періоду року.

Для досягнення поставленої в дослідженні мети виконувалися такі *завдання*:

- проаналізувати часову динаміку смертності населення України від усіх причин і від хвороб системи кровообігу;
- підтвердити і проаналізувати сезонну складову смертності населення із застосуванням графічних і статистичних методів;
- провести оцінку і аналіз співвідношення таких характеристик екологічного ризику як співвідношення шансів (Odds Ratio) і відносний ризик (Relative Risk) надлишкової смертності населення у зимовий період року у порівнянні з літнім.

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Явище надлишкової смертності розглядається у сучасних вітчизняних і зарубіжних публікаціях [1-8]. Вивченню поняття надлишкової смертності присвячено дослідження Ю.І. Муромцевої [1, с. 140], в якому надано таке визначення «надсмертність (надлишкова смертність) – це тимчасове перевищення рівня смертності (числа смертей) у певному населенні або певній групі (статевій, соціально-економічній, професійній тощо) над рівнем смертності іншого населення (групи). Надсмертність є результатом дії комплексу факторів, що визначають рівень смертності в населенні, зокрема це такі фактори навколишнього середовища, як холод, спека, голод, епідемії, пандемії, геноциди, війни» [1, с. 140-141]. В [1] це явище вивчається у різноманітних аспектах. Серед вітчизняних авторів роль певних природних факторів (в тому числі й метеорологічних) на формування смертності населення розглядається в [2, с. 120-122].

У зарубіжних авторів питання вивчення причин надлишкової смертності має значно більше поширення і представлено у вигляді публікацій в авторитетних зарубіжних виданнях – [3-8]. У першу чергу це [3], в самій назві якої присутнє поняття надлишкового ризику, і в якій досліджуються питання врахування фактора холоду у формуванні надлишкової смертності в холодний, і теплий періоди року [3, с. 486]; як основна причина надлишкової смертності розглядається ни-

зька температура. Масштабне дослідження колективу авторів [4, с. 369-375] присвячено аналізу причин смерті більш 74 мільйонів осіб в різних країнах світу за певні періоди з 1985 по 2012 роки. В результаті дослідження було показано, що 7,71 % смертей обумовлена неоптимальною температурою; а переважна кількість смертей під впливом температури, пов'язана із холодом, а не зі спекою. Також, у публікаціях [3,4] показано, що підвищення ризику надлишкової смертності пояснюється не екстремальними температурами, а помірним холодом протягом тривалого періоду часу.

У [5, с. 86-93] сезонність розглядається як ключовий фактор надлишкової смертності в 43 країнах світу і надається прогноз щодо зміщення піку надлишкової смертності з холодного сезону на теплий на тлі глобальних змін клімату. У наступному дослідженні [6] сезонна надлишкова смертність розглядається як ключовий фактор скорочення життя населення Італії. Ці ж питання для 20 країн Європи за період 2000-2019 років розглядається у [7, с. 466-471]. Істотну надлишкову смертність холодного періоду року констатували навіть в країнах субтропічного клімату (Гонконг), визначивши ризик похолодання на тлі глобального потепління як ключовий фактор зростання кількості серцево-судинних хвороб й респіраторних захворювань [8]. В [8] вивчена роль таких умов зовнішнього середовища, як добова мінливість температури, кількість холодних днів, екстремальна відносна вологість, ризик перепади атмосферного тиску та ін.

У публікаціях вітчизняних і зарубіжних авторів для вивчення сезонної складової формування надсмертності населення застосовують різноманітні методи статистичного аналізу. В представленій статті для оцінки екологічних ризиків застосовано матричний метод (використання таблиць спряженості), теоретичні аспекти якого добре показані В.І. Бредуном [9, с. 98-102], а практичне застосування – у дослідженні О.П. Фаюри і співавторів [10, с. 54-59]. Підтвердження сезонної складової смертності населення України здійснювалося із застосуванням аналізу Фур'є, добре описаного у спеціальній літературі, в тому числі у [11, с. 33-41].

3. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для проведення цього дослідження застосовувалися статистичні матеріали, що представляють собою щомісячні значення чисельності населення України, кількості померлих від усіх причин, від хвороб системи кровообігу ХСК (в тому числі від

ішемічної хвороби серця ІХС і цереброваскулярних хвороб ЦВХ) за період з січня 2015 року по січень 2022 року. Джерелом інформації послужили відповідні статистичні матеріали, отримані на інформаційному порталі Мінфін [12]. З цього ж джерела були отримані характеристики смертності населення по роках.

Для проведення дослідження застосовано такі методи:

Графічний – для візуалізації статистичної інформації щодо смертності і чисельності населення.

Кореляційний – полягає у визначенні парного коефіцієнта кореляції Пірсона для характеристики тісноти лінійного зв'язку між двома рядами даних (застосовувано для визначення лінійного зв'язку між щомісячними значеннями показників кількості смертей).

Аналіз Фур'є – для виявлення значимих періодичностей у часових рядах щомісячних значень кількості смертей від усіх причин, а також від ХСК, ІБС та ЦВХ. Сутність методу полягає у розкладенні показника (смертність у часі) з великою кількістю «шумів» на прості гармонійні коливання (синусоїди і косинусоїди), що його складають. За допомогою цього методу дані переводяться з часового вигляду (по осі X – час) у частотну область (по осі X – частота або період), що дозволяє побачити цикли (періодичності), приховані всередині даних, навіть якщо вони не помітні візуально [11, с. 33-41].

Матричний – метод побудування таблиць спряженості для визначення ризику кількості надлишкових смертей у зимовий період у порівнянні із літнім. Теоретичні аспекти методу висвітлені в [9, с. 98-102]. Сутність методу полягає у структуруванні даних для виявлення статистичного зв'язку між двома категоріальними показниками: фактором сезонності (зима-літо) й результатом (кількість померлих та кількість живих). Це дозволяє оцінити, наскільки ризик смерті вищий (або нижчий) у певний період року. Для реалізації методу здійснювалося структурування даних – створювалася таблиця 2x2, де рядки – це сезон року (зима і літо), а стовпчики – це кількість померлих і кількість тих, хто залишився живим.

У табл. 1 представлений загальний вигляд таблиці спряженості, яка застосовувалася для обчислення показника співвідношення шансів (Odds Ratio - OR), а також відносного ризику (Relative Risk – RR) того, що кількість смертей взимку перевищує відповідний період влітку (з червня по серпень).

Відповідно до табл. 1 визначається співвідношення шансів, що характеризує, наскільки ризик

померти взимку вищий ніж у літку (загальний приклад реалізації подібної методики представлений у [10, с. 54-55].

Таблиця 1 – Обчислення відношення шансів і відносного ризику [10, с. 54]

Table 1 – Calculation of odds ratio and relative risk

Кількість осіб	Кількість померлих	Кількість живих	Усього
Взимку	a	b	a + b
Влітку	c	d	c + d
Усього	a + c	b + d	a+b+c+d

Для визначення OR застосовується формула:

$$OR = (ad)/(bc), \quad (1)$$

де a, b – кількість померлих і кількість живих взимку;

c, d – кількість померлих і кількість живих влітку.

Далі оцінюється відносний ризик, який показує наскільки ймовірність смерті взимку перевищує її ймовірність влітку. Для оцінки відносного ризику застосовувалася формула онлайн-статистичного калькулятора для оцінки RR, отримана з [13] і основана на моделі Е. Альтмана:

$$RR = \frac{a(a+b)}{c(c+d)}. \quad (2)$$

RR вважається більш прямим, ніж OR, методом порівняння ймовірностей в двох групах (зима і літо) і застосовується переважно у когортних дослідженнях. OR застосовується для проведення ретроспективних досліджень (випадок-контроль). У цьому дослідженні обидва показники застосовані одночасно.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

4.1 Аналіз смертності населення України. Виявлення сезонної складової

Хвороби системи кровообігу тривалий час залишаються основною причиною смерті населення України. На рис. 1 показано основні причини смерті населення України за даними у січні 2022 року – доля хвороб системи кровообігу складає 64,2 % (за даними 2020 року цей показник складав 66,3 %, а у 2021 – 60,2 %), на другому місці знаходяться новоутворення – 10,1 %, третє місце у січні 2022 року посідали смерті від COVID-19, а відсоток зовнішніх причин смерті, хвороб органів травлення і хвороб органів дихання складала 3,5-4,3 %, усіх інших причин смерті – лише 6,3 %.

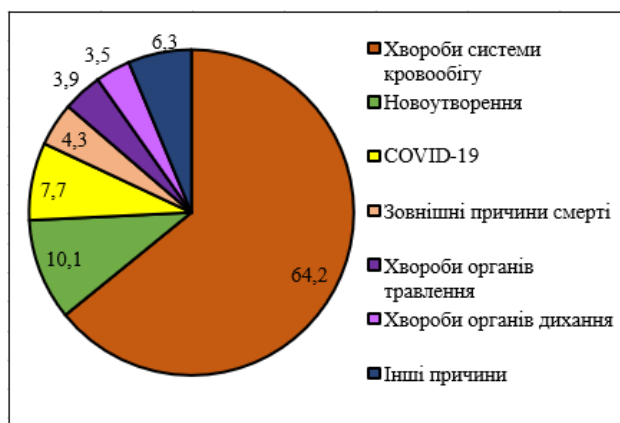


Рис. 1 – Основні причини смерті населення України, січень 2022 року

Fig. 1 – The main causes of death of the population of Ukraine, January 2022

Доля ХСК не тільки найбільша серед інших причин, вона помітно перебільшує усі інші причини смерті. Внесок таких нозологічних форм ХСК як ІХС у формуванні смертності від усіх причин також дуже високий (відповідно 44,8 % і 12,4 %).

Якщо подивитися на часову динаміку смертності населення України по роках (рис. 2), побудовану за даними [13], то вона виглядає досить плавною – з декількома максимумами і мінімумами і без візуально помітного «шуму».

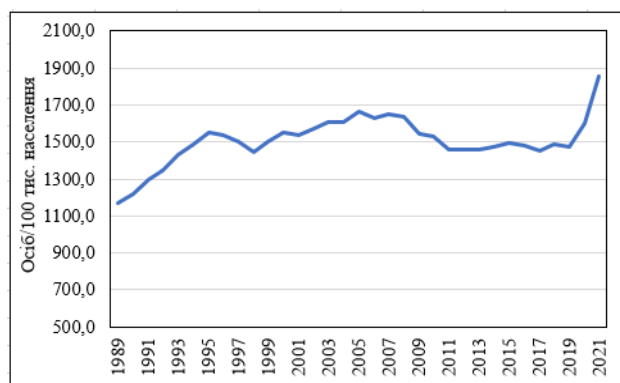


Рис. 2 – Динаміка щорічної смертності населення України від усіх причин в 1989-2021 роках

Fig. 2 – Dynamics of annual mortality of the population of Ukraine from all causes in 1989-2021

Однак, огляд літературних джерел [3-8] вказує на наявність сезонної складової даних про смертність. Отже, слід дослідити більш деталізовану інформацію. На рис. 3 представлена кількість смертей по місяцях за період з січня 2015 року по січень 2022 року. На цьому графіку інша картина – окрім великої кількості коливань показника смертності добре проглядають мінімуми у літній

період и максимуми – у зимовий.

На рис. 4 представлена динаміка щомісячної смертності від ХСК, а також двох нозологічних форм цього класу хвороб – ІХС і ЦВХ за той же період часу (показник для ЦВХ за своїми значеннями помітно нижчий ніж для ХСК та ІХС, тому на графіку представлений на допоміжній осі У, що відмічено за допомогою символу «*»).

На рис. 4 видно, що динаміка кожного з цих показників має ті ж самі тенденції, що і на рис. 3. Для визначення лінійного зв'язку між кількістю смертей від усіх причин і смертей від ХСК, ІХС та ЦВХ був розрахований коефіцієнт кореляції Пірсона, значення якого складають 0,875-0,919, що показує на тісний лінійний зв'язок між цими показниками смертності. Кількість смертей від ІХС та ЦВХ корелює із ХСК, коефіцієнт кореляції відповідно складає 0,998 й 0,985, тобто зв'язок майже прямий.

4.2 Статистичне виявлення сезонної складової показників смертності населення

Для підтвердження наявності сезонної складової для показників кількості смертей від усіх причин і ХСК був застосований спектральний аналіз Фур'є. Обчислення здійснювалося для кількості смертей від усіх причин і від ХСК. Для ІХС і ЦВХ окреме обчислення недоцільне через тісний лінійний зв'язок з показником смертності від ХСК. В результаті обчислення були отримані періоди, частоти, коефіцієнти біля синусів і косинусів функцій, що застосовувалися для розкладення часового ряду показника смертності, спектрограми (сума квадратів коефіцієнтів біля синусів і косинусів для кожного періоду/частоти) і спектральна щільність.

На рис. 5 представлені графіки із значеннями спектрограми (ось У), що відповідає кожному виявленому періоду. На обох графіках можна побачити, що саме періоду 12 місяців відповідає найбільше значення спектрограми. Цей результат статистично підтверджує наявність сезонної складової смертності як від усіх хвороб, так і від ХСК.

На об'єктивність картини могла б вплинути наявність сезонної складової чисельності населення в Україні. Динаміка щомісячних значень кількості населення в Україні, показана на рис. 6. З цього рис. видно, що такої циклічності немає. Додатковим підтвердженням відсутності сезонності цього показника є результат аналізу Фур'є – встановлено, що спектрограма для 12 місяців взагалі не є статистично значимою.

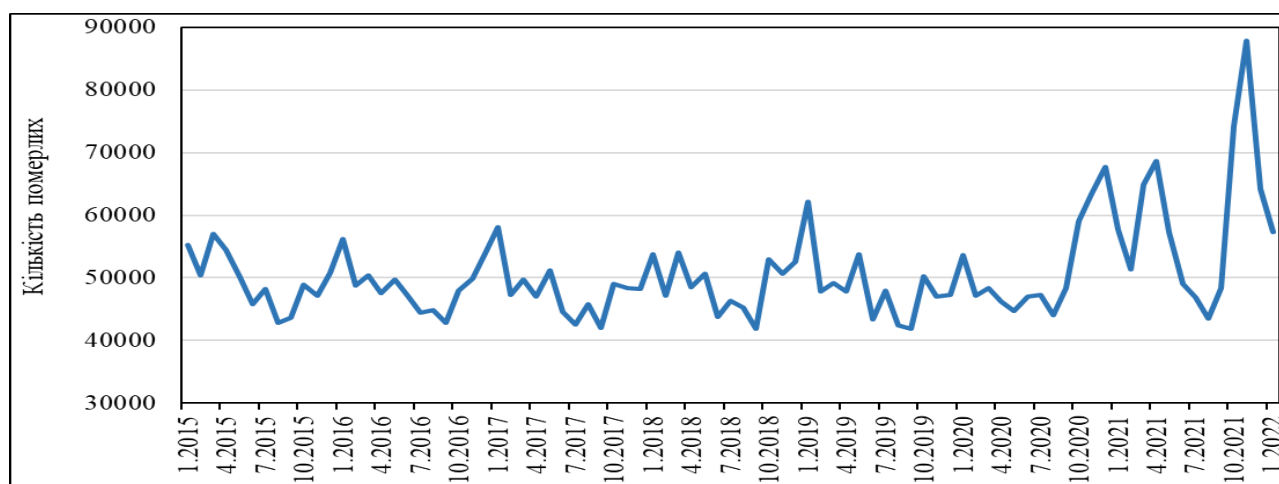


Рис. 3 – Динаміка щомісячної кількості смертей від усіх причин в Україні

Fig. 3 - Dynamics of the monthly number of deaths from all causes in Ukraine

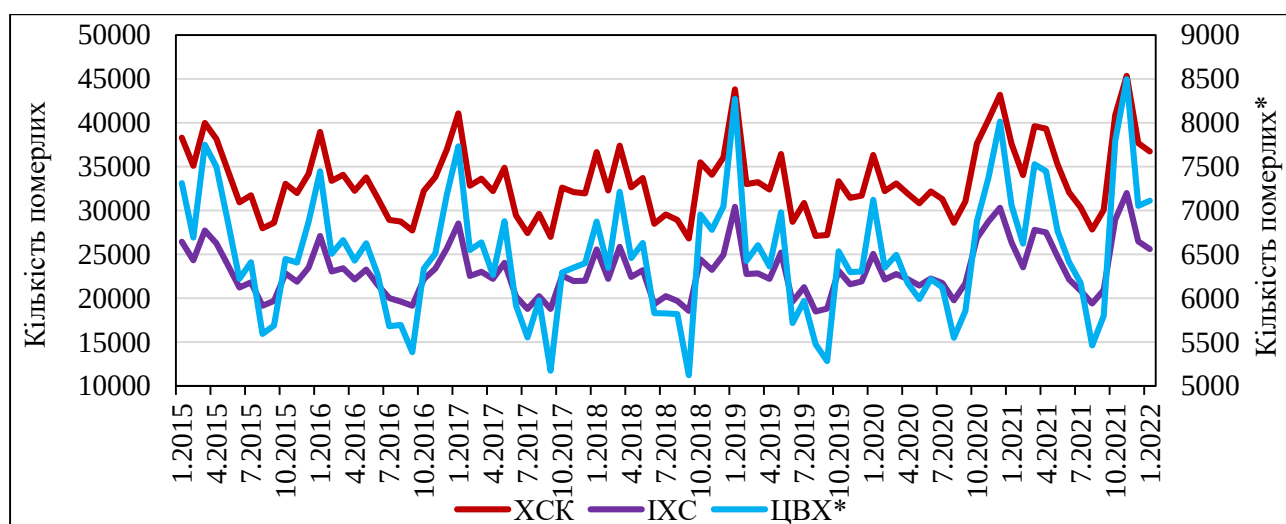


Рис. 4 – Динаміка кількості смертей від хвороб системи кровообігу (в тому числі, від ішемічної хвороби серця і цереброваскулярних хвороб) в Україні

Fig. 4 – Dynamics of the number of deaths from diseases of the circulatory system (including from ischaemic heart diseases and cerebrovascular diseases) in Ukraine

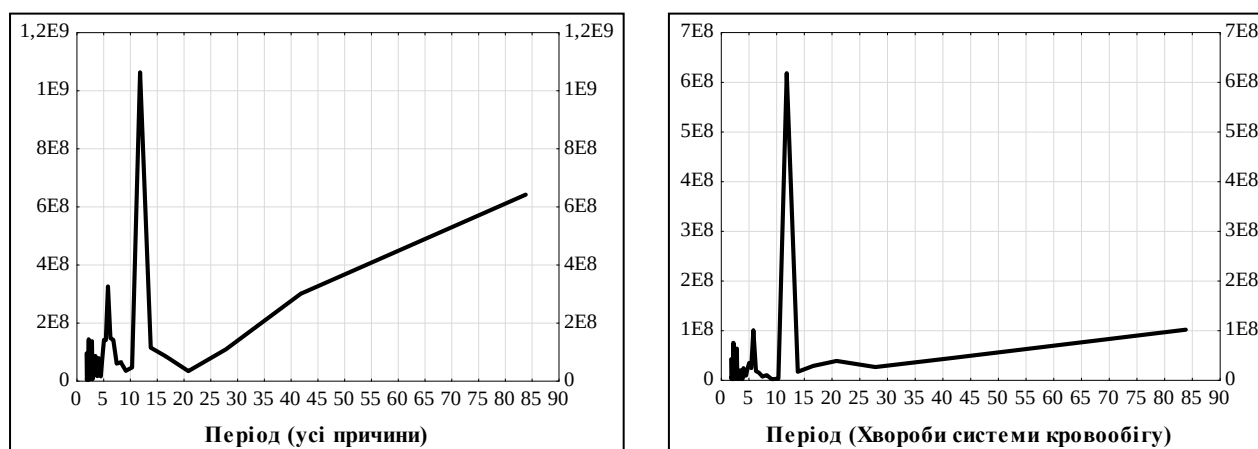


Рис. 5 – Спектрограми аналізу Фур'є для щомісячної кількості смертей від усіх причин і від хвороб системи кровообігу

Fig. 5 – Spectrograms of Fourier analysis for monthly all-cause and diseases of the circulatory system

Отже, показник чисельності населення не має впливу на періодичності у кількості смертей населення (від усіх причин і ХСК).

А загальне зниження показника (близько 2 млн. осіб за період з січня 2015 по січень 2022 років) вказує тільки на те, що при переході від кількості смертей до смертності екстремуми показника мають бути менш помітними у лівій частині графіків смертності і більш помітні – у правій.

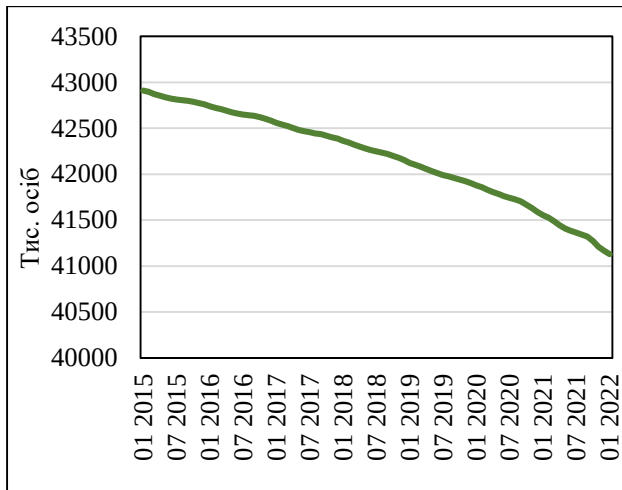


Рис. 6 – Динаміка щомісячного показника кількості населення в Україні

Fig. 6 - Dynamics of the monthly population indicator in Ukraine

Виявлені і підтверджені сезонні коливання смертності населення України вимагають пояснення причин, через які вони виникли.

Сезонність показників смертності пов'язують із складним комплексом біологічних, екологічних і соціальних факторів. Вважається, що переважне навантаження у зимовий період здійснюється на серцево-судинну і дихальну системи. Низькі температури стають причиною холодового стресу, що викликає звуження судин кровоносної системи, а отже підвищення артеріального тиску і збільшення навантаження на серце.

Під впливом холоду відбувається згущення крові – збільшується ризик утворення тромбів, а також виникнення інфарктів і інсультів.

У зимовий період збільшується фізичне навантаження на людину, обумовлене носінням важкого верхнього одягу, ходінням через кучугури. Через холодний стрес і через зменшення утворення вітаміну Д відбувається загальне зниження імунітету. Взимку людина менш рухлива, менше знаходиться на свіжому повітрі.

Додатковим фактором впливу, типовим саме для холодного періоду року, є забруднення атмосферного повітря (пов'язано із проходженням

опалювального сезону), що може стати додатковим фактором навантаження на серцево-судинну систему.

Все це показує, що надлишкова кількість смертей взимку, в тому числі від хвороб системи кровообігу, обумовлена не тільки холодом.

4.3 Оцінка і аналіз співвідношення шансів і відносного ризику надлишкової смертності населення у зимовий період

Отримавши статистичне підтвердження вираженої сезонної складової смертності населення від усіх причин, а також від ХСК, можна переходити до безпосереднього визначення оцінок ризику, пов'язаних із надлишковою смертністю взимку. Доцільно вказати, що у представленому дослідженні йдеться про зимовий період року, а не про холодний.

Для визначення показників ризику надлишкової смертності визначалися значення OR і RR для кожного з повних (є дані за усі 3 місяці) зимових і літніх періодів з січня 2015 по січень 2021 років. Для цього визначалися сумарна кількість смертей протягом зимнього сезону (це зими 2015-2016, 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019, 2019-2020, 2020-2021 років) і протягом літнього сезону (літо 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 і 2021 років). Кількість живих визначалася щомісяця – як різниця між кількістю населення і кількістю смертей (від усіх причин). Порівняння відбувалося для зими і літа, що наступало після цієї зими. Для зим 2014-2015 років і 2021-2022 років визначення ризиків не здійснювалося через неповні дані.

Розрахунок співвідношення шансів (OR) надлишкової кількості смертей від усіх причин, від ХСК, ІХС і ЦВХ взимку здійснювався за формулою (1). Розрахунок відносного ризику надсмертності у зимовий період у порівнянні з літнім – за формулою (2). Результати розрахунків цих показників представлені в табл. 2 і 3. Отримані характеристики ризику мають високий рівень значимості ($P < 0,0001$). Розрахунки здійснювалися за допомогою онлайн-калькулятора статистики MedCalc [13].

Аналіз табл. 2 показує, що шанс померти взимку (усі причини смерті) у порівнянні із літнім періодом вищий на 6,7-26,2 %, для хвороб системи кровообігу це ці показники складають 8,5-26,7 %, для ішемічної хвороби серця – 8,1-31,4 %, а для цереброваскулярних хвороб – 10,2-26,3 %. Найменший шанс таких надлишкових смертей спостерігався взимку 2019-2020 років (і для усіх причин, і для ХСК). Найбільший – взимку 2020-2021 років для усіх причин смерті та 2018-

2019 років – для хвороб системи кровообігу (в тому числі для ішемічної хвороби серця і цереброваскулярних хвороб).

Таблиця 2 – Розраховані значення співвідношення шансів (OR) надлишкової смертності населення України у зимовий період

Table 2 – Calculated values of the odds ratio (OR) of excess mortality of the population of Ukraine in the winter period

Період	Усі причини	ХСК	ІХС	ЦВХ
Зима 2015-2016/Літо 2016	1,1389	1,1933	1,2015	1,1778
Зима 2016-2017/Літо 2017	1,1961	1,2784	1,2930	1,2270
Зима 2017-2018/Літо 2018	1,0991	1,1569	1,1733	1,1196
Зима 2018-2019/Літо 2019	1,2131	1,2984	1,3136	1,2634
Зима 2019-2020/Літо 2020	1,0670	1,0852	1,0805	1,1018
Зима 2020-2021/Літо 2021	1,2620	1,2671	1,2795	1,1971

В табл. 3 показані результати розрахунків відносного ризику RR, який показує у скільки разів ймовірність померти взимку перевищує ймовірність померти влітку.

Таблиця 3 – Розраховані значення відносного ризику (RR) надлишкової смертності населення України у зимовий період

Table 3 – Calculated values of the relative risk (RR) of excess mortality of the population of Ukraine in the winter period

Період	Усі причини	ХСК	ІХС	ЦВХ
Зима 2015-2016/Літо 2016	1,1384	1,1928	1,2012	1,1777
Зима 2016-2017/Літо 2017	1,1954	1,2777	1,2924	1,2268
Зима 2017-2018/Літо 2018	1,0987	1,1565	1,1730	1,1196
Зима 2018-2019/Літо 2019	1,2122	1,2976	1,3109	1,2632
Зима 2019-2020/Літо 2020	1,0667	1,0850	1,0804	1,1017
Зима 2020-2021/Літо 2021	1,2609	1,2663	1,2789	1,1960

З табл. 3 можна побачити, що ймовірність ризику надлишкової смерті взимку перевищує її влітку на 6,7-26,1 % (усі причини), на 8,5-26,6 % (ХСК), на 8,0-31,1 % (ІХС) та на 10,2-26,3 % (ЦВХ). Найсприятливіші і найнесприятливіші роки з точки зору ймовірності надлишкової смерті ідентичні з OR.

Мало відрізняються й абсолютні значення OR

і RR. Таке явище є характерним для «досить рідкої події» (кількість померлих на тлі всього населення) і вказує на те, що у випадку формулювання завдання, як це було зроблено у цьому дослідженні, немає різниці між застосуванням співвідношення шансів чи відносного ризику.

5. ВИСНОВКИ

Проведені дослідження дозволили зробити такі висновки:

1) хвороби системи кровообігу є основною причиною смерті населення України, їх внесок в загальну смертність складає 60 і більше відсотків;

2) характер динаміки показника смертності в Україні залежить від періоду його осереднення – щорічний показник смертності змінюється досить плавно із загальною тенденцією до зростання; щомісячний – характеризується дуже інтенсивними коливаннями з вираженою сезонною складовою;

3) сезонна складова показника смертності населення України проявляється для усіх причин смерті, смерті від хвороб системи кровообігу, ішемічної хвороби серця й цереброваскулярних хвороб; наявність сезонної складової смертності підтверджена статистично за допомогою спектрального аналізу Фур'є;

4) сезонні коливання показника смертності населення України не залежать від чисельності населення і відбувалися на тлі його стійкого скорочення;

5) співвідношення шансів померти у зимній період у порівнянні з літнім в Україні складає 6,7-26,2 % для усіх причин смерті, 8,5-26,7 % для ХСК, 8,4-31,4 для ІХС і 10,2-26,3 % для ЦВХ;

6) відносний ризик надлишкової кількості смертей взимку складає 6,7-26,1 % для усіх причин смерті, 8,5-26,6 % для ХСК, 8,0-31,1 % для ІХС і 10,2-26,3 % для ЦВХ;

7) найнижчі значення OR і RR надлишкової смертності спостерігалися взимку 2019-2020 років; найвищі – 2020-2021 років для всіх причин смерті і 2018-2019 років для ХСК, ІХС та ЦВХ.

співвідношення шансів і відносний ризик надлишкової смерті у зимовий період майже не відрізняється – це стосується як смерті від усіх причин, так і від хвороб системи кровообігу (включаючи нозологічні форми);

8) незначна різниця між співвідношенням шансів і відносним ризиком пов'язана з тим, що смертність зі статистичної точки зору є «досить рідкою подією», а, з практичної точки зору, це означає, що у подібних дослідженнях достатньо

застосовувати лише один з досліджених показників ризику;

9) Висока синхронність часових рядів смерті від усіх причин і від хвороб системи кровообігу, а також одночасні зміни ризиків надлишкової смертності від цих причин показують, що смертність від ХСК є важливішим фактором, що визначає ризики надсмертності населення України у зимовий період.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Муромцева Ю.І. Надсмертність та її вимірювання в Україні в умовах пандемії COVID-19. Географія та туризм : Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, 26 лютого. Харків, 2021. С. 140-153. URL: <http://dspace.hnpu.edu.ua/handle/123456789/4272>
2. Грабко Н.В., Колісник А.В. Екологічні фактори впливу на смертність населення Одеської області. Український гідрометеорологічний журнал. 2024. №33. С. 115-124. <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.01>
3. Hajat Sh., Gasparrini A. The excess winter deaths measure why its use is misleading for public health understanding of cold-related health impacts. *Epidemiology*. 2016. 27 (4). Pp. 486-491. URL: <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000479>
4. Seasonality of mortality under climate change: a multicountry projection study / Madaniyazi L. et al. *The Lancet. Planetary Health*. 2024. 8(2). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00269-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00269-3)
5. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study / Gasparrini A. et al. *The Lancet*. 2015. 386 (9991). Pp. 369-375. URL: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
6. Isabella Marinetti, Dmitri A. Jdanov, Domantas Jasilionis, Marilia Nepomuceno, Fanny Janssen Seasonal mortality and its impact on spatial inequality in life expectancy across Italy. Original research / Marinetti I. et al. *European Journal of Population*. 2025. 41:30. <https://doi.org/10.1007/s10680-025-09753-7>
7. Seasonality in mortality and its impact on life expectancy levels and trends across Europe. / Marinetti I. et al. *Journal of Epidemiology & Community Health*. 2025. Vol. 79. Pp. 466-473. <https://doi.org/10.1136/jech-2024-223050>
8. Chau P.H., Woo J. The trends in excess mortality in winter vs. summer in a sub-tropical city and its association with extreme climate conditions. *PLoS ONE*. 2015. 10(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126774>
9. Бредун В.І. Екологічна безпека та управління ризиками: навчальний посібник. Полтава: Видання Національного університету імені Юрія Кондратюка, 2021. 189 с.
10. Чинники ризику: методика визначення й оцінювання, прогнозування в медицині (огляд літератури; приклади використання у власній клінічній практиці) – повідомлення перше / Фаюра О.П. та ін. *Lviv Clinical Bulletin*. 2021. 1(33) – 2(34). С. 51-64. <https://doi.org/10.25040/lkv2021.01-02.051>
11. Яровий А.Т., Страхов Є.М. Аналіз часових рядів. Навчально-методичний посібник для студентів математичних та економічних спеціальностей. Одеса: Освіта України, 2019. 109 с. URL: https://onu.edu.ua/pub/bank/userfiles/files/fmfit/nachalni_materiali/navch_mat_111_mag/analiz_chasovykh_ryadiv.pdf
12. Інформаційний портал Мінфін. URL: <https://minfin.com.ua/> (Accessed May 10, 2026)
13. MedCalc Software Ltd. Relative Risk Calculator (Risk Ratio, 2x2 Table). URL: https://www.medcalc.org/en/calc/relative_risk.php (Version 23.5.5; accessed May 12, 2026)

REFERENCES

1. Muromtseva Yu.I. (2021) [Mortality and its measurement in Ukraine in the context of the COVID-19 pandemic]. Materials IV Vseukrainskoi nauково-praktychnoi internet-konferentsii «Heohrafiia ta turyzm» [Materials of the 4th All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference «Geography and tourism»], 26 february. Kharkiv, pp. 140-153. URL: <http://dspace.hnpu.edu.ua/handle/123456789/4272>
2. Hrabko N.V., Kolisnyk A.V. (2024). [Environmental factors affecting the mortality of population in Odesa region]. *Ukrains'kij gidrometeorologichnij zhurnal* [Ukrainian hydrometeorological journal], 33, pp. 105-119. <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.01>
3. Hajat Sh., Gasparrini A. (2016). The excess winter deaths measure why its use is misleading for public health understanding of cold-related health impacts. *Epidemiology*, 27 (4), pp. 486-491. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000479>
4. Madaniyazi L. et al. (2024). Seasonality of mortality under climate change: a multicountry projection study. *The Lancet. Planetary Health*, 8(2), pp. 86-94. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00269-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00269-3)
5. Gasparrini A. et al. (2015). Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet*, 386 (9991), pp. 369-375. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
6. Marinetti I., Jdanov D. A., Jasilionis D. et al. (2025). Marilia Nepomuceno, Fanny Janssen Seasonal mortality and its impact on spatial inequality in life expectancy across Italy. Original research. *European Journal of Population*, 41:30. <https://doi.org/10.1007/s10680-025-09753-7>
7. Marinetti I. et al. (2025). Seasonality in mortality and its impact on life expectancy levels and trends across Europe. *Journal of Epidemiology & Community Health*, vol. 79, pp. 466-473. <https://doi.org/10.1136/jech-2024-223050>
8. Chau P.H., Woo J. (2015). The trends in excess mortality in winter vs. summer in a sub-tropical city and its association with extreme climate conditions. *PLoS ONE*, 10(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126774>
9. Bredun V.I. (2021). *Ekologichna bezpeka ta upravlinnia ryzykami: navchalnyi posibnyk* [Environmental safety and risk management: a study guide]. Poltava: Vydannia Natsionalnoho universytetu imeni Yuriia Kondratiuka. 189 p. (in Ukr.)
10. Fayura O., Maksymuk A., Abrahamovych O. et al. [Risk Factors: Method of Determination and Evaluation, Prognosis in Medicine (Literature Review; Examples of Use in Own Clinical Practice) – First Notice]. [*Lviv Clinical Bulletin*], 1(33) – 2(34), pp. 51-64. <https://doi.org/10.25040/lkv2021.01-02.051>
11. Iarovy A.T., Strakhov Ye.M. (2021) *Analiz chasovykh ryadiv. Navchalno-metodychnyi posibnyk dlia studentiv matematychnykh ta ekonomichnykh spetsialnostei* [Time series analysis. Educational and methodological manual for students of mathematical and economic specialties]. Аналіз часових рядів. Навчально-методичний посібник для студентів математичних та економічних спеціальностей. Одеса: Освіта України. (in Ukr.) URL: https://onu.edu.ua/pub/bank/userfiles/files/fmfit/nachalni_m

12. Informatsiyni portal Minfin [Information portal Minfin]. Available at: <https://minfin.com.ua/> (Accessed: 17 May 2026). (in Ukr.) URL: <https://minfin.com.ua/> (Accessed May 10, 2026)
13. MedCalc Software Ltd. Relative Risk Calculator (Risk Ratio, 2x2 Table). https://www.medcalc.org/en/calc/relative_risk.php (Version 23.5.5; accessed May 12, 2026)

SEASONAL COMPONENT OF THE MORTALITY RISK AMONG THE POPULATION OF UKRAINE FROM DISEASES OF THE CIRCULATORY SYSTEM

N. V. Hrabko

*Odesa I.I. Mechnikov National University
2, V. Zmiiienka Str., Odesa, 65000, Ukraine
grabkonatalyavikt@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1412-5683>*

An important feature of population mortality in different countries of the world is the seasonal component. This means that in the cold period of the year, the number of deaths increases compared to the warm period. Such a phenomenon is almost never described in domestic scientific publications, but it found important confirmation in the research of foreign authors.

The presented study is dedicated to the study and statistical confirmation of the seasonal component of the indicator of the number of deaths from diseases of the circulatory system against the background of mortality from all causes, as well as the determination of the risks of excess mortality due to the role of the seasonal factor.

To realize the goal of the study, the time series of the number of deaths of the population from all causes and from diseases of the circulatory system (including 2 nosological forms of this class of diseases) was analyzed, first graphically, and then statistically confirmed the presence of the main period of 12 months. Confirmation of the presence of this period of population mortality made it possible to assess such characteristics of environmental risk as the odds ratio and the relative risk of excess mortality of the population of Ukraine in the winter period compared to the summer period.

Graphical, statistical (correlation analysis and Fourier analysis) and matrix (construction and analysis of conjugation tables) research methods were widely used in the conducted research.

The results of the work were estimates of odds ratios (6.7-26.2% for all causes of death, 8.5-26.7% for diseases of the circulatory system, 8.1-31.4% for ischaemic heart diseases, 10.2-26.3% for cerebrovascular diseases) and relative risk (6.2-26.1% for all causes of death, 8.2-26.6% for diseases of the circulatory system, 8.1-31.1% for ischaemic heart diseases, 10.2-26.3% for cerebrovascular diseases) of excess mortality of the population in winter compared to the summer period.

The obtained results indicate that the environmental risks of excess mortality of the population of Ukraine are mainly determined by the corresponding characteristics of the risks from diseases of the circulatory system against the background of a whole complex of environmental factors that are typical for the cold period of the year.

Keywords: excess mortality, diseases of the circulatory system, winter season, odds ratio, relative risk

*Подання до редакції: 24. 01. 2026
Надходження остаточної версії: 25. 03. 2026
Публікація статті: 25. 05. 2026*

УДК 628.35:579.68:504.064

ІННОВАЦІЙНЕ ТЕХНОЛОГІЧНЕ РІШЕННЯ РЕГУЛЯЦІЇ РЕЖИМУ АЕРАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ЗА УМОВ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ МІКРОБІОЦЕНОЗУ АКТИВНОГО МУЛУ В БІОСПОРУДАХ

¹А. В. Пасенко, ²І. О. Солошич, ³О. В. Новохатько

¹Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, 39600, Кременчук, Україна, pasenkoalena2015@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1108-0408>

²Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, 39600, Кременчук, Україна, soloishych@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-8842-5120>

³Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Університетська, 20, 39600, Кременчук, Україна, olga.novohatko2022@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-0604-3362>

Розробка інноваційних еколого-біотехнологічних рішень щодо підвищення ефективності біоочищення стічних вод в аеротенках досягаються шляхом комплексного підходу із забезпечення стабільного перебігу біохімічних процесів окислення забруднень мікроорганізмами активного мулу, що включає технічну модернізацію, автоматизацію процесів та оптимізацію технологічних параметрів. Актуальним залишається пошук шляхів оптимізації технологічних параметрів подачі, контакту стоків та мулової суміші в біоспорудах для підвищення високого ступеня очищення стічних вод, що є ключовим елементом забезпечення екологічної безпеки, сталого розвитку промислових регіонів за умов зниження негативного впливу на довкілля. Метою статті є розробка інноваційного технологічного рішення щодо режиму аерації мікробіоценозу біоспоруд в технології очищення стічних вод шляхом регуляції навантаження на активний мул за умов зниження забруднення природних водних об'єктів навколишнього середовища. Об'єктом дослідження у роботі є біотехнологія очищення стічних вод за участю мікроорганізмів активного мулу в аеротенках за умов зниження забруднення природних водних об'єктів навколишнього середовища. Предметом роботи є дослідження технологічних умов оптимізації режиму аерації в аеротенку-змішувачі для ефективного функціонування мікробіоценозу активного мулу в біотехнології очищення стічних вод. У роботі використані теоретичні методи (аналіз, синтез, узагальнення, порівняння та систематизація наукових джерел і нормативних документів), емпіричні методи (відбір і зберігання проб стічної води, гідробіологічний аналіз активного мулу, визначення віку активного мулу, навантаження на активний мул, концентрації розчиненого кисню у стічній воді, витрати стічної води), методи інтерпретації та узагальнення результатів, які дозволили оцінити основні параметри функціонування організмів активного мулу та визначити ступень біоочищення стічних вод в аеротенку. Наукова новизна полягає у розробці технологічного рішення щодо регуляції режиму аерації мікробіоценозу активного мулу в технології очищення стічних вод шляхом зниження навантаження за органічною речовиною у разі розосередженої подачі стоків за довжиною аеротенка-змішувача. Практичною цінністю роботи є розробка за результатами гідробіологічного аналізу активного мулу та умов його функціонування заходів щодо оптимізації параметрів аерації, навантаження за органічною речовиною у стоках в аеротенку-змішувачі шляхом розосередженого впуску стічних вод у певному співвідношенні на три впускних вікна з метою забезпечення високої ефективності їх біоочищення та зниження забруднення природних водних.

Визначено, що оптимальним розподілом стічних вод за довжиною біоспоруди для оптимізації умов аерації за рахунок збалансування навантаження за органічною речовиною на активний мул буде подача стоків на три впускних вікна аеротенка-змішувача у відсотковому співвідношенні до загальних витрат води відповідно: 48,3%, 36,7%, 15,0%. У результаті навантаження за органічною речовиною на активний мул буде максимальним на початку першого коридору і мінімальним – наприкінці другого, концентрація розчиненого кисню – врівноваженою у стоках біоспоруди, а можливість надходження неочищеної води у відвідну систему на очисній станції буде виключена, що зменшить забруднення водою.

Ключові слова: гідросфера, очищення стічних вод, аеротенк, інноваційне технологічне рішення, режим аерації, мікробіоценоз активного мулу.

1. ВСТУП

Гідросфера є однією з ключових складових біосфери, що забезпечує існування живих організмів та стабільність глобальних екологічних процесів. Проте інтенсивна антропогенна діяльність призвела до суттєвого погіршення якості водних ресурсів. Забруднення водних ресурсів є однією з найгостріших екологічних проблем сучасності.

Скидання недостатньо очищених стічних вод у поверхневі водні об'єкти є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасного стану гідросфери. Це призводить до деградації водних екосистем, погіршення якості питної води, накопичення токсичних речовин у біоценозах.

Вирішення екологічної проблеми потребує комплексного підходу, що включає модернізацію технологій очищення стічних вод. Зростання обсягів промислових і побутових стоків, а також ускладнення їхнього хімічного складу зумовлюють необхідність впровадження ефективних методів глибокого очищення. Традиційні технології часто не забезпечують належного рівня видалення забруднювальних речовин, патогенних мікроорганізмів, що обумовлює актуальність застосування інноваційних підходів щодо підвищення ефективності очищення стічних вод.

Біологічне очищення із застосуванням активного мулу, біореакторів із прикріпленою мікрофлорою та мембранних біореакторів (MBR) є ефективними технологіями видалення забруднень зі стоків. Інноваційні біотехнології дозволяють поєднувати біологічні процеси з мембранною фільтрацією, що значно підвищує якість очищення. Більш ефективними є комбіновані системи, які поєднують декілька методів очищення (наприклад, біологічне очищення + мембранна фільтрація + озонування).

Такий підхід дозволяє досягти високого ступеня очищення та адаптувати технологію до різних типів стічних вод. Аналіз показує, що жодна окрема технологія не є універсальною. Найкращі результати досягаються при інтеграції різних методів.

Мембранні технології забезпечують найвищу якість очищення, проте потребують значних ресурсів. Біологічні методи є економічно вигідними, але менш ефективними щодо мікрозабруднювачів [1].

Окиснювальні процеси доцільно використовувати як етап доочищення.

Але основною технологічною ланкою з вилучення органічних забруднень зі стічних вод є біоспорида очищення стічних вод. Найбільш поширено запроваджуються на очисних станціях для очищення комунальних та промислових стоків біоспорида – аеротенки. Біологічне очищення в аеротенках базується на процесах біохімічного окиснення органічних речовин мікроорганізмами активного мулу. Крім окиснення органічних сполук в аеротенках відбуваються процеси нітрифікації на етапі їх глибокої мінералізації, які є високочутливими до концентрації розчиненого кисню, температури, рН стічних вод.

Значною мірою ефективність процесу біоочищення стічних вод залежить від фізіологічного стану активного мулу в біоспоридах, що насамперед обумовлено режимом аерації біоценозу. Аерація є визначальним елементом функціонування аеротенків і безпосередньо впливає на ефективність біологічного очищення стічних вод.

Вона забезпечує подачу розчиненого кисню, необхідного для життєдіяльності аеробних мікроорганізмів активного мулу, а також підтримує гідродинамічний режим, інтенсифікує масоперенесення кисню з газової фази у рідину, переміщує мулову суміш зі стічними водами, запобігаючи утворенню анаеробних зон та сприяючи рівномірному контакту біомаси із субстратом.

Оптимальна концентрація розчиненого кисню у воді в біоспоридах для ефективного функціонування мікроорганізмів активного мулу становить 2–4 мг/дм³ [2].

Ефективність біологічного очищення стічних вод значною мірою визначається способом подачі кисню до активного мулу.

Незважаючи на широкий спектр сучасних аераційних систем, їх експлуатація супроводжується рядом технічних, енергетичних та технологічних проблем, що впливають на стабільність процесу очищення. Недостатня аерація призводить до розвитку анаеробних процесів, зниження ефективності очищення, утворення запахів. Надмірна аерація, у свою чергу, викликає підвищене енергоспоживання і руйнування флокул активного мулу.

Технологічні проблеми у режимі аерації в аеротенках призводять до погіршення процесу нітрифікації забруднень у стічних водах, викликають розвиток нитчастих бактерій, призводять до нестабільності активного мулу. Неповна нітрифікація речовин стоків сприяє

утворенню парникових газів, у тому числі N_2O , що обумовлює вторинне забруднення об'єктів гідросфери.

Вказана проблема має комплексний характер й охоплює гідродинамічні, біохімічні та енергетичні аспекти. Підвищення ефективності аерації є ключовим завданням оптимізації процесів біологічного очищення стічних вод. Сучасні підходи базуються на комплексному вдосконаленні конструкцій аераційних систем, режимів їх роботи та методів автоматизованого керування.

Але значною мірою біохімічний аспект ефективності біоочищення стічних вод залежить від технологічного параметра навантаження на активний мул за органічною речовиною стоків, що нівелює запровадження найсучаснішої системи аерації в очисних спорудах. Врівноваження навантаження на активний мул за довжиною споруди в аеротенках значною мірою оптимізує процеси аерації та біоокислення забруднень у стоках за умов нормалізації функціонування активного мулу [3].

Інноваційні технологічні рішення щодо підвищення ефективності біоочищення стоків в аеротенках досягаються шляхом комплексного підходу із забезпечення стабільного перебігу біохімічних процесів окислення забруднень мікроорганізмами активного мулу, що включає технічну модернізацію, автоматизацію процесів та оптимізацію технологічних параметрів [4].

Актуальним залишається пошук шляхів оптимізації технологічних параметрів подачі, контакту стоків та мулової суміші в біоспородах для підвищення високого ступеня очищення стічних вод, що є ключовим елементом забезпечення екологічної безпеки, сталого розвитку промислових регіонів за умов зниження негативного впливу на довкілля.

Метою статті є розробка інноваційного технологічного рішення щодо режиму аерації мікробіоценозу біоспород в технології очищення стічних вод шляхом регуляції навантаження на активний мул за умов зниження забруднення природних водних об'єктів.

Мета реалізована у наступних завданнях:

- аналіз роботи споруд біоочищення стічних вод на очисній станції;
- проведення гідробіологічного аналізу індикаторних організмів активного мулу з визначенням основних параметрів функціонування мулу та ступеня біоочищення стічних вод в аеротенку міських очисних споруд;

– розробка технологічного рішення щодо оптимізації умов аерації та навантаження на активний мул в аеротенку міських очисних споруд.

Об'єктом дослідження у роботі є біотехнологія очищення стічних вод за участю мікроорганізмів активного мулу в аеротенках за умов зниження забруднення природних водних об'єктів

Предметом роботи є дослідження технологічних умов оптимізації режиму аерації в аеротенку-змішувачі для ефективного функціонування мікробіоценозу активного мулу в біотехнології очищення стічних вод.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі досліджено процес біоочищення комунальних стічних вод в аеротенках міських очисних споруд (Полтавська область). Витрати стоків, що надходять на очисну станцію, становлять у середньому $5500 \text{ м}^3/\text{добу}$, БСК_{повн} стічної води – 110 мг/дм^3 .

У процесі дослідження було використано комплекс методів. Зокрема, теоретичні методи (аналіз, синтез, узагальнення, порівняння та систематизація наукових джерел і нормативних документів), емпіричні методи (відбір і зберігання проб стічної води, гідробіологічний аналіз активного мулу, визначення віку активного мулу, навантаження на активний мул, концентрації розчиненого кисню у стічній воді, витрати стічної води), методи інтерпретації та узагальнення результатів, які дозволили оцінити основні параметри функціонування організмів активного мулу та визначити ступінь біоочищення стічних вод в аеротенку.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Біоочищення стоків на станції відбувається в аеротенках-змішувачах за умов безперервної аерації суміші стічної рідини та активного мулу (рис. 1).

Подача стічних вод до аеротенку після первинних відстійників відбувається по центральному розподільчому лотку до коридору аеротенка через три впускні вікна, що перекриваються шиберами. Наявність впускних вікон дозволяє забезпечити роботу аеротенка у двох режимах [5]:

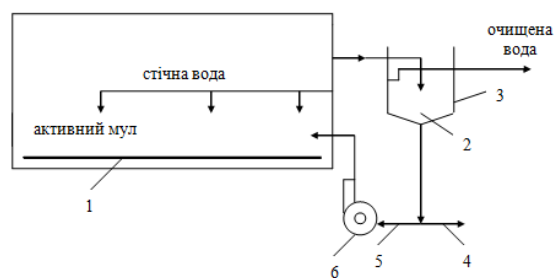


Рис. 1 – Схема роботи аеротенка:

1 – пристрій для подачі повітря; 2 – осад активного мулу; 3 – відстійник; 4 – надлишковий мул; 5 – зворотний мул; 6 – насос

Fig. 1 – Aerotank operation diagram:

1 – air supply device; 2 – activated sludge sediment; 3 – settling tank; 4 – excess sludge; 5 – return sludge; 6 – pump

– без регенерації активного мулу (при $БСК_{20}=250$ мг/дм³ стічних вод або при зменшенні обсягів стоків, що надходять на станцію, подача стічної води у 1-ий та 2-ий впуски становить 40 % від загальної кількості стоків, а у 3-й впуск – 20 %);

– з регенерацією активного мулу (при $БСК_{20}>250$ мг/дм³ стічних вод або при залпових скидах частина аеротенка від 25% до 50% відводиться під регенератор активного мулу, при цьому подачу стічних вод у 3-й впуск закрито, а у 1-ий та 2-ий впуски – становить 60 і 40 % відповідно).

До аеротенків безперервно подається циркуляційний зворотний мул із вторинних відстійників. Коридорні аеротенки обладнані пневматичною системою аерації, що забезпечує подачу кисню у складі повітря, підтримку мулу у завислому стані й постійне перемішування стічної води з мулом по всій довжині аеротенка. Специфікою роботи аеротенків-змішувачів є уповільнена швидкість окислення органічних забруднень, що призводить до можливого виходу з біоспород недостатньо очищених стічних вод.

Тому при експлуатації аеротенків-змішувачів постає нагальне прикладне завдання щодо ретельного спостереження за ефективністю біоочищення стоків та розробки на очисній станції певних технологічних рішень щодо регуляції режиму аерації та навантаження на активний мул за органічною речовиною у стічній воді.

Для аналізу ефективності роботи аеротенків-змішувачів на міській очисній станції під час досліджень проведений гідробіологічний аналіз

активного мулу, що характеризує склад, кількісний розподіл та фізіологічний стан організмів біоценозу мулу – біоагентів-окислювачів, мінералізаторів забруднень стічних вод.

Характерні зміни у біоценозі активного мулу відображають перебіг процесу біоочищення, дозволяють швидко оцінити ступень біоокислення забруднень та зробити висновки про несприятливі фактори, що погіршують ефективність очищення стічних вод. Результати проведеного гідробіологічного аналізу, стан активного мулу свідчать про перевантаження мулу за органічною речовиною, вплив токсикантів і нестачу кисню. Такі умови характеризуються незначною різноманітністю гідробіонтів при вираженому домінуванні за кількістю 2–4 видів.

У біоценозі активного мулу аеротенків виявлено велику кількість безбарвних джгутикових роду *Bodo*, дрібних амеб, хижих сисних інфузорій родів *Podophrya*, *Tokophrya*, хижих війчастих інфузорій роду *Litonotus*. Були присутні у значних кількостях війчасті інфузорії роду *Vorticella*, значно менших – роду *Opercularia* та ін. Відмічено розвиток специфічних нитчастих форм мікроорганізмів, що викликають «спухання» мулу, погіршують його осідання у вторинних відстійниках та у результаті знижують якість очищеної води. Поява у біоценозі активного мулу великої кількості безбарвних джгутикових класу *Mastigophora* (тип *Sarcomastigophora*) також свідчить про перевантаження мулу за органічною речовиною, сполуками Нітрогену та нестачу кисню.

Численні представники прикріплених кругловічастих інфузорій *Vorticella microstoma* та *Vorticella submicrostoma* підтверджують виявлений стан активного мулу, тому що розвиваються у сильно забрудненому на органічній речовині середовищі [6].

Колір активного мулу зафіксований як сірий з коричневим відтінком, відмічено неприємний гнильний запах, присутність численних органічних включень й сміття, пластівці мулу дрібнодисперсні, вода над мулом каламутна. За результатами гідробіологічного аналізу стан активного мулу у біоспородах встановлений як перевантажений в умовах нестачі кисню.

Для зіставлення віку активного мулу і допустимого навантаження на мул за органічною речовиною в аеротенку використовують дані табл. 1.

Таблиця 1 – Допустиме навантаження на активний мул залежно від його віку
Table 1 – Permissible load on activated sludge depending on its age

Вік мулу, доба	1	3	5	7	10	20
Навантаження на мул, мг БСК _{повн} /г сухої речовини мулу на добу	1000	400	250	200	70	50

Для ефективного очищення стічних вод рекомендовано використання активного мулу віком не більше 3–7 діб, що пов'язано з його високою ферментативною активністю, окислювальною потужністю, задовільним флокуло утворенням із досягненням необхідного ступеню очищення вод на очисних спорудах. Але «молоді» мули досить чутливі до змін умов середовища, впливу екотоксикантів, ксенобіотиків, що знижує ефективність процесів біологічного очищення стічних вод. Тому в умовах роботи очисних станцій з нестабільними за складом і кількістю стічними водами, підвищеним ступенем їх токсичності та біорезистентності, реалізуються процеси біоочищення мулами зрілого віку (понад 10 діб), здатних нівелювати залпові скиди важко окислювальних, токсичних забруднювальних речовин.

За результатами проведених у роботі розрахунків отримано значення віку активного мулу в аеротенках, який становив 10,993 діб, а навантаження на активний мул за органічною речовиною – 359,36 мг БСК_{повн}/г·добу, що перевищує у 5 разів допустиме навантаження для мулу віком близько 10 діб. Розраховані показники свідчать про перевантаження активного мулу у біоспорудах та як наслідок – негативний вплив на його фізіологічний стан токсичних сполук субстрату, що знижує ефективність біоочищення стічних вод. Існує пропорційна залежність між швидкістю споживання органічних сполук мікроорганізмами мулу та швидкістю споживання кисню. На початку аеротенка-змішувача відбувається інтенсивне споживання органічних речовин та кисню, тому що в аеротенк випускають концентровані стічні води і циркуляційний зворотній активний мул. У зв'язку з цим, при обмеженій кількості розчиненого кисню у стічній воді його концентрація в муловій суміші в стоках на початку аеротенка залишається на невисокому рівні (менше 2 мг О₂/дм³), що сповільнює

швидкість біохімічного окислення органічних забруднень. Результати визначення концентрації розчиненого кисню у першому коридорі аеротенка-змішувача наведено на рис. 2.

Концентрація розчиненого кисню, мг/дм³

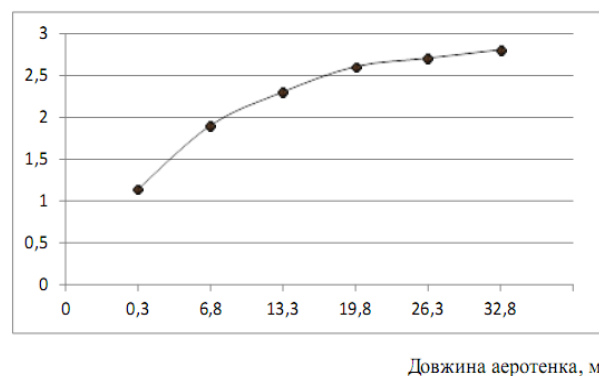


Рис. 2 – Динаміка концентрації розчиненого кисню по довжині першого коридору аеротенка-змішувача з пневматичною аерацією

Fig. 2 – Dynamics of dissolved oxygen concentration along the length of the first corridor of the aeration tank-mixer with pneumatic aeration

Технологічне регулювання концентрації розчиненого кисню у стічній воді в коридорах аеротенка-змішувача відповідно до нормативних вимог щодо якості очищення стоків можливе шляхом зниження в них концентрації органічних забруднень у разі розосередженої їх подачі за довжиною очисної споруди. Таким чином, розосереджену подачу стічної води в аеротенку можна здійснити таким чином, щоб навантаження на мул залишалось постійним за всією його довжиною. Стічну воду в аеротенк необхідно подавати не рівномірно, а з витратами, що постійно зменшуються за довжиною споруди, які у точності співпадають із зменшенням концентрації мулу внаслідок розбавлення, що й дає змогу отримати навантаження на мул постійним, тобто знизити навантаження за органічною речовиною в аеротенку, що забезпечить якість очищеної води на виході зі споруди нормативним вимогам.

У роботі розроблено режим роботи аеротенка, який забезпечує постійне навантаження на активний мул за довжиною аеротенку шляхом розосередженої подачі стічної води. Таким чином, аеротенк з нерівномірно розподіленою подачею рідини об'єднує в собі основні переваги аеротенка-змішувача та аеротенка-витискувача. Мул в аеротенках за розробленим режимом знаходитиметься в одній окремій фазі розвитку, а швидкість вилучення забруднень, їх окислення та споживання кисню стануть сталими,

можливість потрапляння неочищеної води у відвідну систему з очисних споруд буде зведена до мінімуму. Загальна біомаса активного мулу, відповідно і пропускна здатність у біоспорах цього типу буде вищою.

На підставі проведених розрахунків встановлено, що оптимальним розподілом стічних вод за довжиною аеротенка буде розподіл стоків на три впускні вікна (рис. 3). Такий розподіл стічних вод сприяє помірному споживанню кисню за довжиною аеротенка, підвищенню окисної потужності аеротенка та зменшенню навантаження на активний мул.

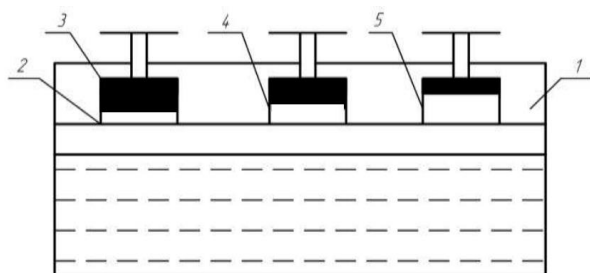


Рис. 3 – Розташування впускних вікон у першому коридорі аеротенка-змішувача:

1 – розподільчий лоток;
2, 4, 5 – впускні вікна подачі стічної води;

3 – шибери для регулювання витрати стічних вод **Fig. 3** – Location of inlet windows in the first corridor of the aeration tank-mixer:

1 – distribution tray;
2, 4, 5 – wastewater inlet windows;
3 – gate valves for regulating wastewater flow

Навантаження за стічною водою по довжині споруди обчислюють за формулою:

$$q_x = \frac{aQ}{2l} \cdot \frac{(1/a + 1)^2 - 1}{\sqrt{x[(1/a + 1)^2 - 1]/l + 1}}, \quad (1)$$

де, a – кількість зворотного мулу, у долях одиниці від витрати стічної води; Q – загальні витрати стічних вод, $\text{м}^3/\text{с}$; l – довжина біоспоруди, м ; x – відстань від початку впуску стоків до заданого перетину, м .

На досліджених очисних спорудах для розрахунку параметрів режиму роботи аеротенка-змішувача вихідними даними щодо розмірів споруди були: довжина аеротенка – 39 м ; відстань між початком впуску стічної води та першим зливним вікном – 2 м , між першим і другим зливними вікнами – 15 м , між другим і третім – 17 м .

За результатами проведених розрахунків витрати стічної води на три впускні вікна в аеротенку-змішувачі розподілилися наступним чином:

$$q_1 = \frac{0,74 \cdot 0,064}{2 \cdot 39} \cdot \frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{\sqrt{2 \left[\frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{39}\right] + 1}} = 0,002477 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$q_2 = \frac{0,74 \cdot 0,064}{2 \cdot 39} \cdot \frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{\sqrt{17 \left[\frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{39}\right] + 1}} = 0,00159 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$q_3 = \frac{0,74 \cdot 0,064}{2 \cdot 39} \cdot \frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{\sqrt{34 \left[\frac{\left(\frac{1}{0,74} + 1\right)^2 - 1}{39}\right] + 1}} = 0,00123 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Відповідно до отриманих значень щодо загальних витрат стічної води навантаження за трьома зливними вікнами розподілилося у наступних співвідношеннях:

$$\frac{q_1}{Q} \cdot 100 = 48,3 \%;$$

$$\frac{q_2}{Q} \cdot 100 = 36,7 \%;$$

$$\frac{q_3}{Q} \cdot 100 = 15,0 \%.$$

На підставі проведених розрахунків визначено, що оптимальним розподілом стічних вод за довжиною біоспоруди для оптимізації умов аерації за рахунок збалансування навантаження за органічною речовиною на активний мул буде подача стоків на три впускні вікна аеротенка-змішувача у відсотковому співвідношенні до загальних витрат води відповідно: 48,3%, 36,7%, 15,0%. Таким чином, навантаження за органічною речовиною на активний мул буде максимальним на початку першого коридору і мінімальним – наприкінці другого, концентрація розчиненого кисню – врівноваженою у стоках біоспоруди, а можливість надходження неочищеної води у відвідну систему на очисній станції буде виключена.

Наукова новизна полягає у розробці технологічного рішення щодо регуляції режиму аерації мікробоценозу активного мулу в технології очищення стічних вод шляхом зниження навантаження за органічною речовиною у разі розосередженої подачі стоків за довжиною аеротенка-змішувача.

Практичною цінністю роботи є розробка за результатами гідробіологічного аналізу

активного мулу та умов його функціонування заходів щодо оптимізації параметрів аерації, навантаження за органічною речовиною у стоках в аеротенку-змішувачі шляхом розосередженого впуску стічних вод у певному співвідношенні на три впускних вікна з метою забезпечення високої ефективності їх біоочищення та зниження забруднення природних водних об'єктів.

4. ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що біоочищення стічних вод на очисних спорудах відбувається в аеротенках-змішувачах з пневматичною системою аерації у двох режимах: без регенерації активного мулу (при $БСК_{20}=250$ мг/дм³ стоків або зменшенні їх загальних витрат) та з регенерацією активного мулу (при $БСК_{20}>250$ мг/дм³ стоків або при залпових їх скидах). Недоліком роботи аеротенків-змішувачів є уповільнена швидкість окислення органічних забруднень, що обумовлює скиди недостатньо очищених стічних вод. Тому важливим є ретельний контроль за ефективністю біоочищення стоків та розробка технологічних рішень регуляції режиму аерації та навантаження на біоценоз споруд.

2. Визначено за результатами гідробіологічного аналізу стан активного мулу в аеротенках очисних споруд як перевантажений, що працює в умовах нестачі кисню. Спостерігається незначна різноманітність гідробіонтів при вираженому домінуванні за кількістю 2–4 видів, розвиток нитчастих форм мікроорганізмів, що викликають «спухання» мулу, погіршують його осідання у вторинних відстійниках та у результаті знижують якість очищеної води. Значення концентрації розчиненого кисню стоків у біоспорудах свідчать, що на початку першого коридору аеротенка-змішувача відбувається інтенсивний впуск органічних речовин, погіршення кисневих умов, уповільнення швидкості біохімічного окислення органічних забруднень і як наслідок – зниження ефективності біоочищення стічних вод.

3. Запропоновано інноваційне технологічне рішення щодо регулювання режиму аерації в технології очищення стічних вод за умов оптимізації функціонування мікробіоценозу активного мулу шляхом розосередженої подачі стоків у три впускні вікна першого коридору аеротенка-змішувача відповідно у відсотковому співвідношенні до загальних витрат води: 48,3%, 36,7%, 15,0%. Оптимізація режиму аерації

активного мулу в біоспорудах за рахунок збалансування навантаження за органічною речовиною по довжині аеротенку підвищить ефективність біоочищення та виключить скидання неочищених стічних вод у природні водойми, що зменшить забруднення навколишнього середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гриневич, А., Саблій, Л., Жукова, В., Ляшок, І. Ефективність біологічного очищення стічних вод з використанням іммобілізованих мікроорганізмів на носіях різних типів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2025. № 52. С. 16–23. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.52.16-23>.
2. Міць М. Г., Білошенко К. С., Божков, А. І. Дослідження щодо вдосконалення способу періодичної аерації стічних вод. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2021. № 1. С. 90-95. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vntuhpi_2021_1_15.
3. Liu X., Nie Y., Wu X.-L. Predicting microbial community compositions in wastewater treatment plants using artificial neural networks. *Microbiome*. 2023. Vol. 11. Article 93. DOI: 10.1186/s40168-023-01519-9.
4. Zhao L., Fu G., Zeng A. et al. Effects of different aeration strategies and ammonia-nitrogen loads on nitrification performance and microbial community succession. *Chemosphere*. 2023. Vol. 339. Article 139685. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139685.
5. Саблій Л. А., Ободович О. М., Сидоренко В. В., Кононцев С. В., Коренчук М. С. Використання аераційної системи ежекторного типу для біологічного очищення стічних вод. *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті*. 2018. №1 (22). С. 51–59. DOI: 10.20535/2218-93002212018144244.
6. Cheng Y., Wang K., Zhang K. et al. Full-scale upgrade activated sludge to continuous-flow aerobic granular sludge. *Water Research*. 2024. Vol. 248. Article 120870. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120870.

REFERENCES

1. Hrynevych, A., Sablii, L., Zhukova, V., Liashok, I. Efficiency of biological wastewater treatment using immobilized microorganisms on different types of carriers. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*. 2025. № 52, S. 16–23. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.52.16-23>.
2. Mits M. H., Biloshenko K. S., Bozhkov, A. I. Research on improving the method of periodic aeration of wastewater. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seria: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. 2021. № 1. S. 90-95. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vntuhpi_2021_1_15.
3. Liu X., Nie Y., Wu X.-L. Predicting microbial community compositions in wastewater treatment plants using artificial neural networks. *Microbiome*. 2023. Vol. 11. Article 93. DOI: 10.1186/s40168-023-01519-9.
4. Zhao L., Fu G., Zeng A. et al. Effects of different aeration strategies and ammonia-nitrogen loads on nitrification performance and microbial community succession. *Chemosphere*. 2023. Vol. 339. Article 139685. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139685.

5. Sablii L. A., Obodovych O. M., Sydorenko V. V., Konontsev S. V., Korenchuk M. S. Use of an ejector-type aeration system for biological wastewater treatment. *Voda i vodoochysni tekhnolohii. Naukovo-tekhichni visti.* 2018. №1 (22). S. 51–59. DOI: 10.20535/2218-93002212018144244.
6. Cheng Y., Wang K., Zhang K. et al. Full-scale upgrade activated sludge to continuous-flow aerobic granular sludge. *Water Research.* 2024. Vol. 248. Article 120870. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120870.

INNOVATIVE TECHNOLOGICAL APPROACH TO AERATION REGIME CONTROL IN TECHNOLOGY FOR WASTEWATER TREATMENT THROUGH OPTIMIZATION OF THE ACTIVATED SLUDGE MICROBIOCENOSIS IN BIOLOGICAL TREATMENT SYSTEMS

¹A. V. Pasenko, ²I. O. Soloshych, ³O. V. Novohatko

¹ Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, University Street, Kremenchuk, 39600, Ukraine
pasenkoalena2015@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-1108-0408>

² Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, University Street, Kremenchuk, 39600, Ukraine
soloishych@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-8842-5120>

³ Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, University Street, Kremenchuk, 39600, Ukraine
olga.novohatko2022@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-0604-3362>

The development of innovative environmental and biotechnological solutions aimed at improving the efficiency of wastewater biological treatment in aeration tanks is achieved through an integrated approach that ensures the stable progression of biochemical oxidation processes carried out by activated sludge microorganisms. This approach includes technical modernization, process automation, and optimization of technological parameters. The search for ways to optimize the technological parameters of wastewater supply, contact between wastewater and sludge mixture in biological treatment facilities remains highly relevant for achieving a high degree of wastewater purification. This is a key element in ensuring environmental safety and the sustainable development of industrial regions while reducing negative impacts on the environment. The purpose of the article is to develop an innovative technological solution for regulating the aeration mode of the microbiocenosis in biological treatment facilities within the technology of wastewater treatment by controlling the load on activated sludge under conditions of reducing pollution of natural water bodies. The object of the study is the biotechnology of wastewater treatment involving activated sludge microorganisms in aeration tanks under conditions of reducing pollution of natural aquatic environments. The subject of the study is the investigation of technological conditions for optimizing the aeration mode in a mixing aeration tank to ensure the effective functioning of the activated sludge microbiocenosis in wastewater treatment biotechnology. The study employed theoretical methods (analysis, synthesis, generalization, comparison, and systematization of scientific sources and regulatory documents), empirical methods (sampling and storage of wastewater samples, hydrobiological analysis of activated sludge, determination of activated sludge age, activated sludge loading, dissolved oxygen concentration in wastewater, and wastewater flow rate), as well as methods of interpretation and generalization of results, which made it possible to evaluate the main parameters of activated sludge organism functioning and determine the degree of wastewater biological treatment in the aeration tank. The scientific novelty lies in the development of a technological solution for regulating the aeration regime of the activated sludge microbiocenosis in the technology of wastewater treatment by reducing the organic matter load through distributed wastewater inflow along the length of the mixing aeration tank. The practical significance of the work consists in the development, based on the results of hydrobiological analysis of activated sludge and the conditions of its functioning, of measures for optimizing aeration parameters and organic matter loading in wastewater within a mixing aeration tank by means of distributed wastewater inflow in a specific ratio through three inlet windows. This approach ensures high wastewater treatment efficiency and reduces pollution of natural water bodies.

It was determined that the optimal distribution of wastewater along the length of the biological treatment facility for optimizing aeration conditions through balancing the organic matter load on

activated sludge involves supplying wastewater to the three inlet windows of the mixing aeration tank in the following percentage ratio of the total water flow: 48.3%, 36.7%, and 15.0%, respectively. As a result, the organic matter load on activated sludge will be maximal at the beginning of the first corridor and minimal at the end of the second corridor, while the dissolved oxygen concentration will remain balanced within the treatment facility wastewater. Moreover, the possibility of untreated water entering the discharge system at the treatment plant will be eliminated, thereby reducing pollution of water bodies.

Key words: hydrosphere, wastewater treatment, aeration tank, innovative technological solution, aeration regime, activated sludge microbiocenosis.

Подання до редакції : 25. 02. 2026

Надходження остаточної версії : 28. 04. 2026

Публікація статті : 25. 05. 2026

Згідно із Рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1280 від 12.06.2025 р. журнал зареєстрований як друковане медіа з ідентифікатором R30–06291.

The state registration of print media is **R30–06291**, originating date is 12.06.2025

Рекомендовано до друку вченою радою Одеського національного університету імені І.І. Мечникова, протокол № 10, 26. 05. 2026 р.

Recommendations from Science Council of Odesa I. I. Mechnikov National University, Protocol no. 10, 26. 05. 2026

Адреса редакційної колегії:

65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15,
Одеський національний університет імені І. І.
Мечникова,
тел.: 38(048) 763 05 19
gidro@onu.edu.ua

Editorial board address:

65016, Odesa, 15 Lvivska st.
Odesa I. I. Mechnikov National University
tel.: 38(048) 763 05 19
gidro@onu.edu.ua

Видавець:

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
вул. Змієнка Всеволода, буд. 2, м. Одеса, 65001, Україна
Телефон: +38 (048) 723 28 39
E-mail: druk@onu.edu.ua

Видавництво і друкарня

Друкарня ТакиБук:
Телефон: +38 (050) 555 00 69
E-mail: mailbox@takibook.od.ua

ISSN 2311-0902 (print). Український гідрометеорологічний журнал. 2026. № 36. 1 – 157.
ISSN 2616-7271 (online). Ukraïns'kij gidrometeorologičnij žurnal. 2026. № 36. 1 – 157.
Український гідрометеорологічний журнал
Ukrainian Hydrometeorological Journal